

Akademie der Wissenschaften in Wien
Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse

Monatshefte für Chemie

und
verwandte Teile anderer Wissenschaften

Schriftleitung: Der Sekretär der mathematisch-naturwissenschaftlichen
Klasse E. Späth unter Mitwirkung von J. M. Eder und A. Skrabal

Geschäftsführender Herausgeber:
F. v. WESSELY

74. Band, 6. Heft

Mit 2 Textfiguren

(Ausgegeben im Dezember 1943)



Leipzig und Wien 1943

Akademische Verlagsgesellschaft
Becker & Erler Kom.-Ges., Leipzig

Kommissionsverleger der Akademie der Wissenschaften in Wien: Hölder-Pichler-Tempsky
Wien und Leipzig

Mh. Chem.

Der Bezugspreis beträgt pro Band RM 28.80

In h a l t

Seite

<i>Skrabal A.</i> , Die chemische Bruttoreaktion als Ergebnis von Simultanreaktionen. (Eingegangen am 5. 5. 1943.)	293
<i>Kahorec L.</i> und <i>Kohlrausch K. W. F.</i> , Studien zum Raman-Effekt. (147. Mitteilung.) (Mit 2 Figuren im Text.) (Eingegangen am 23. 6. 1943)	333

Bei der Schriftleitung eingegangene Arbeiten:

Hölzl F., Verbindungen höherer Ordnung der Hexazyankobalt(III)-Säure. (Mit einer Figur im Text.) (Eingegangen am 25. 9. 1943.)

Gruber W., Über substituierte Cumarsäuren. (Eingegangen am 12. 10. 1943.)

Dischendorfer O., *Hinrichs H.* und *Scheutschenko J.*, Über die Kondensation von Benzoin und α -Naphthol und über einige Derivate des 1-Oxy-2-benzoyl-naphthalins. (Mit einer Figur im Text.) (Eingegangen am 18. 10. 1943.)

Dischendorfer O. und *Hinrichs H.*, Zur Kenntnis der bromierten 2,3-Diphenyl-6,7-benzo-cumarone. (Eingegangen am 18. 10. 1943.)

Über die Aufnahme von Abhandlungen in die „Monatshefte für Chemie“ entscheidet die mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse der Akademie der Wissenschaften. Die Manuskripte, deren Vorlage gewünscht wird, können entweder an die Akademiekanzlei (Wien I. Universitätsplatz 2) oder an einen der auf der ersten Umschlagseite genannten Herren des Schriftleitungs-Ausschusses gesendet werden.

Die chemische Bruttoreaktion als Ergebnis von Simultanreaktionen

Von

A. SKRABAL

Ordentl. Mitglied d. Akad. d. Wissenschaften

Aus dem Chemischen Institut der Reichsuniversität Graz

(Eingegangen am 5. 5. 1943. Vorgelegt in der Sitzung vom 6. 5. 1943)

Inhaltsverzeichnis: § 1 Das Problem. § 2 Die Einzelreaktion. § 3 Die Simultanreaktionen. § 4 Die Zweiakter. § 5 Die Zwischenstoffreaktion. § 6 Das Übergangsprinzip. § 7 Der Einakter. § 8 Das Prinzip der Gleichheit der Partialgeschwindigkeiten. § 9 Die übliche Betrachtungs- und Rechenweise. § 10 Spurenkatalyse. § 11 Die Appendixsysteme. § 12 Mediumkatalyse. — Zusammenfassung und Schlußwort.

Abkürzungen: RD = Richtungsdifferenz; PGP = Prinzip der Gleichheit der Partialgeschwindigkeiten.

§ 1. Das Problem. Das Studium des zeitlichen Verlaufes der chemischen Umsetzungen führte sehr bald zur Erkenntnis, daß die Reaktionen in der Regel zusammengesetzt, also Summenreaktionen oder *Bruttoreaktionen* (englisch mainreaction, mitunter auch netreaction) sind, somit aus Teilreaktionen bestehen, an welchen neben etwaigen Katalysatoren und den Reaktanten der Bruttoreaktion oder den *Stabilen* immer auch kurzlebige *Instabile* (engl. intermediate) beteiligt sind. Die Konzentration der letzteren ist derart gering, daß sie weder die Stöchiometrie der Bruttoreaktion noch das Gleichgewicht der letzteren irgendwie zu beeinflussen vermögen, dagegen bestimmen sie in hervorragendem Maße die *Geschwindigkeit* und das *Zeitgesetz* der Bruttoreaktion. Die Herleitung des letzteren aus der Kinetik der Teilreaktionen auf Grund der Gesetze der klassischen chemischen Kinetik stieß auf schier unüberwindliche Schwierigkeiten.

Da war es M. BODENSTEIN¹, der 1913 durch Aufstellung eines *Postulates* alle diese Schwierigkeiten mit einem Schlag aus der Welt geschafft und damit die Bruttoreaktionen der Erforschung zugänglich gemacht hat, so daß von da ab eine ungeahnte

¹ M. BODENSTEIN, Z. physik. Chem. 85 (1913) 329.

Entwicklung ihren Anfang nahm. Bezeichnet z die Konzentration eines Instabilen und t die Zeit, so setzt BODENSTEIN für jeden instabilen Zwischenstoff eine Gleichung der Form:

$$z' = \frac{dz}{dt} = 0$$

an und gewinnt derart ebensoviel Gleichungen als die Zahl der Instabilen beträgt, womit für den alsbald sich ausbildenden *stationären Zustand* die Konzentrationen der Instabilen und damit die Geschwindigkeit und das Zeitgesetz der Bruttoreaktion sich als *Funktionen der Stabilen allein* darstellen lassen.

Dieses einfache Verfahren hat soviel Bestechendes an sich, daß man es versteht, wenn fast alle Chemiker nach dieser *Rechenweise* und den *Betrachtungen*, die sich an letztere knüpfen, griffen. Es wurde zu dem üblichen und nahezu *alleinherrschenden*².

Die Gleichung $z' = 0$ wurde von BODENSTEIN nicht auf mathematischem Wege durch Herleitung, sondern auf *intuitivem* Wege gewonnen³. Sie ist der klassischen chemischen Kinetik fremd, und daher sieht BODENSTEIN⁴ in seinem Verfahren einen Fortschritt gegenüber der klassischen Kinetik von VAN'T HOFF.

Das Verfahren hat aber auch, wie wiederholt empfunden wurde, etwas *Unbefriedigendes* an sich, denn $z' = 0$ bedeutet die zeitliche *Unveränderlichkeit* des Instabilen, das *Rechenergebnis* lehrt aber, daß die Instabilen weder für die Gesamtzeit der Stationaritätsperiode, noch für mäßige Zeitintervalle der letzteren konstant, sondern ebenso wie die Stabilen *veränderlich* sind. Jeder

² Einen Hinweis hierauf findet man bei H. J. SCHUMACHER, Chemische Gasreaktionen (Dresden 1938) 9. Unter Berufung auf diesen Hinweis sagt H. MARK, Allgem. Grundlagen der hochpolymeren Chemie (Leipzig 1940) 324: „A. SKRABAL hat gegen diese Rechenweise prinzipielle Bedenken geäußert; sie sind aber heute als endgültig widerlegt anzusehen.“ Ich glaube nicht, daß in der Wissenschaft Bedenken gegen eine herrschende Übung und Auffassung damit widerlegt werden können, daß sich sehr viele Gelehrte dieser Auffassung bedienen. Wenn dem so wäre, so hätte die Phlogistontheorie wohl niemals durch die Sauerstofftheorie und das dritte Prinzip von M. BERTHELOT kaum durch den zweiten Hauptsatz und den Wärmesatz verdrängt werden können. Dagegen steckt in einer überholten Auffassung sehr häufig ein *Kern Wahrheit*, der sich in die neuere Anschauung hinüberrettet. Das trifft auch für die übliche Rechen- und Betrachtungsweise zu. Ihn *herauszuschälen*, ist die spezielle Aufgabe meiner Darlegungen in § 9.

³ M. BODENSTEIN, Ber. dtsch. chem. Ges. **70** (A) (1937) 28.

⁴ M. BODENSTEIN, Ber. dtsch. chem. Ges. **75** (A) (1942) 119.

Erklärungsversuch⁵, der von der Gleichung $z' = 0$ seinen Ausgang nimmt, ist daher im vorhinein zum Scheitern verurteilt.

Diese Unstimmigkeit zwischen Postulat und Rechenergebnis hat mich seit 1927 veranlaßt, dem Probleme nachzugehen, und im Jahre 1934 konnte ich⁶, auf dem Boden der klassischen chemischen Kinetik stehend, das „*Prinzip der Gleichheit der Partialgeschwindigkeiten*“ (PGP) aufzeigen, das einer *Lösung* des Problems und zugleich einer *Deutung* der BODENSTEINSchen Rechenweise gleichkommt. Im Verfolg dieses Prinzipes ist $z' \neq 0$, sondern eine *kleine Differenz zweier Terme*, welche letztere man daher einander gleichsetzen darf. In der Tat wird bei der üblichen Rechenweise gar nicht von $z' = 0$, sondern lediglich von der Gleichsetzung seiner Terme Gebrauch gemacht. Als kleine Differenz kann z' wie die unbestimmte Form $\infty - \infty$ jeden Wert haben⁷. Erst im *Gleichgewichte* ist $z' = 0$. Der Unterschied zwischen der zeitlichen Veränderlichkeit der Stabilen und der Instabilen ist demnach der, daß erstere einer *großen*, letztere einer *kleinen* Differenz gleichkommt. Im Gleichgewichte sind *beide* Null. Ferner ergaben meine Untersuchungen, daß die Gleichsetzung der Terme von z' in vielen Fällen zur *Lösung* der Rechenaufgabe, in anderen aber nur zu einer *Teillösung*, und nicht zur *allgemeinen Lösung* führt. Den folgenden Darlegungen voreiligend, sei bereits hier bemerkt, daß letzteres dann zutrifft, wenn „*Spurenkatalyse*“ vorliegt, der Katalysator also ein *Instabiles* ist. Mit dem PGP war zugleich dargetan, daß die klassische Kinetik nicht nur *dasselbe*, sondern darüber hinaus *auch mehr zu leisten* vermag als die übliche Rechenweise.

Die Herleitung des PGP hat von der *Stöchiometrie* der Bruttoreaktion und der Partialreaktionen ihren Ausgang genommen. In der Folgezeit habe ich mich aber immer intensiver dem Studium der *Simultanreaktionen im allgemeinen* zugewandt. Namentlich führte mich die Abfassung einer Monographie⁸ und die Klärung der Begriffe, mit der die Niederschrift eines an weitere

⁵ Vgl. u. a. M. BODENSTEIN, Congr. inter. Quim. pura. apl. (Madrid) 9 II (1934) 256; D. A. FRANK-KAMENETZKI, J. physik. Chem. **14** (1940) 695 (russisch).

⁶ A. SKRABAL, Mh. Chem. **64** (1934) 289.

⁷ A. SKRABAL, Z. Elektrochem. **43** (1937) 309.

⁸ A. SKRABAL, Homogenkinetik (Dresden und Leipzig 1941). Auf diese Monographie sei ein für allemal verwiesen. Siehe auch A. SKRABAL, „Von der Sprache der chemischen Reaktionsgleichungen“ im Jahrbuch der Universität Graz (Graz 1940) 199.

Kreise sich wendenden Buches auch für den Verfasser selbst verbunden⁹ ist, zur Überzeugung, daß die allgemeine „*Theorie der Simultanreaktionen*“ die Basis ist, die einen *vertieftesten Einblick* in das alte Problem der zusammengesetzten Reaktionen wie in das chemische Geschehen überhaupt gewährt. Unter diesem Gesichtswinkel sollen hier vornächst die Systeme, die zu einer und *nur zu einer* Bruttoreaktion führen, behandelt werden.

In seinem ausgezeichneten Büchlein „Physikalische Chemie“ sagt W. KUHN¹⁰: „Der Unterschied zwischen der eigentlichen physikalischen Chemie und ihren Anwendungen besteht vorwiegend gerade darin, daß wir bei der eigentlichen physikalischen Chemie die Bedingungen einfach und passend wählen, so daß z. B. nur eine einzige chemische Umsetzung oder nur ein einziger physikalischer Vorgang stattfindet“. In unserer Macht ist aber allein die Hinarbeitung auf eine *einige Bruttoreaktionen* gelegen, so daß wir leider gezwungen sind, die Gesetzmäßigkeiten der *Einzelreaktionen*, wie vor allem den Einfluß von Temperatur und Medium, vielfach aus dem Verhalten der *Bruttoreaktionen* zu erschließen. Die allgemeine Theorie der Simultanreaktionen ist also *Voraussetzung* für das Studium der einfachen Reaktionen oder „*Urreaktionen*“, und ich bin davon überzeugt, daß eines Tages die Lehr- und Handbücher der physikalischen Chemie neben dem Phasengesetz, der Kolloidik und den vielen anderen Kapiteln auch ein solches über die Simultanreaktionen enthalten werden. Jeder neue Wissenszweig macht aber die Aufstellung einer eigenen Terminologie, die Bildung neuer oder die schärfere Fassung alter Begriffe erforderlich. Der Terminologie und Begriffsbildung wird daher in meinen Darlegungen ein nicht unerheblicher Raum gegeben werden müssen.

§ 2. Die Einzelreaktion. Das Zeitgesetz eines solchen ist von der allgemeinen Form $x' = f(x)$, wo x die *Umsatzvariable* ist. Als *Konstante* enthält diese Funktion die Anfangskonzentrationen der Reaktanten und die beiden Geschwindigkeitskoeffizienten. Im einfachsten Falle einer monomolekularen Reaktion $A \rightleftharpoons B$ gilt $A = a - x$ und $B = b + x$, wenn die Stoffsymbole zugleich auch deren laufende Konzentrationen angeben, und obige Funktion wird von der Form:

$$x' = k_1(a - x) - k_2(b + x).$$

Die Zeit ist die unabhängige, das x die abhängige Veränderliche oder die Stoffvariable, das x' ihre Zeitableitung oder die Reaktionsgeschwindigkeit, der Ausdruck auf der rechten Seite der Gleichung die „*Richtungsdifferenz*“ (RD). Letztere, das x und

⁹ Von einem bekannten Gelehrten erzählt man sich, daß er einmal gesagt haben soll: „Von der Thermodynamik verstehe ich nichts, ich muß ein Buch darüber schreiben“. Das Buch wurde in der Tat geschrieben und ist eines der besten geworden.

¹⁰ W. KUHN, Physik. Chemie (Leipzig 1938) 2.

das x' sind *positiv*, wenn $A \rightarrow B$ die „*effektive Reaktion*“ (engl. *netreaction*) ist. Was wir im üblichen Makroexperimente wahrnehmen, sind immer nur effektive Reaktionen¹¹. Im Verlaufe der Reaktion wird die RD immer kleiner und im *Gleichgewichte* Null. Es wird erst zur Zeit $t = \infty$ erreicht, im *Experimente* ist aber das Gleichgewicht erzielt, wenn die RD eine *kleine Differenz* geworden ist, alsdann kann man $k_1(a-x)$ und $k_2(b+x)$ einander gleichsetzen. Die bis dahin verstrechende Zeit soll als „*Reaktionsdauer*“ bezeichnet werden. Sie ist immer eine endliche und kann mit einer Genauigkeit von etwa einer Zehnerpotenz der Zeit ungefähr angegeben werden.

In der Homogenkinetik ist grundsätzlich jede Reaktion *reversibel*¹²). In Ansehung des *Grades* der Reversibilität können wir aber von einer „*irreversiblen Reaktion*“ dann sprechen, wenn im *Gleichgewichte* die Konzentration $a-x$ des *Eduktes* eine kleine Differenz und damit $x=a$ ist. Auf der anderen Seite stehen die „*umsatzlosen Reaktionen*“. Von einer solchen wollen wir sprechen, wenn im *Gleichgewichte* x gegenüber a *verschwindend klein* ist.

Ahnlich liegen die Dinge bei höhernmolekularen Einzelreaktionen, nur treten hier als neue Begriffe in der Reihe der Ausgangsstoffe oder der Edukte die Begriffe „*Unterschüßstoff*“ und „*Überschüßstoff*“ hinzu. Beispielsweise gilt für die Reaktion $A+B \rightleftharpoons C$ das Zeitgesetz:

$$x' = k_1(a-x)(b-x) - k_2(c+x).$$

Wenn $b > a$ ist A der *Unterschüßstoff* und B der *Überschüßstoff*. Im Falle der *irreversiblen Reaktion* ist im *Gleichgewichte* $x=a$, im Falle der *umsatzlosen Reaktion* $x \ll a$. Ein Umsatz lässt sich bei letzterer *erzwingen*, wenn man das b des *Überschüßstoffes* gehörig groß wählt, im *Experimente* sind jedoch diesen Bestrebungen Grenzen gesetzt. Immerhin gelingt es auf diese Weise bei Reaktionen sehr hoher Molekularität merkliche Umsätze herbeizuführen.

Da es im *Alleingeschehen* weder eine absolute Zeit noch eine absolute Geschwindigkeit gibt, Geschwindigkeiten also stets *bezugsmäßig* (relativ) sind, ist eine für sich allein verlaufende Reaktion weder rasch noch langsam. Wenn wir dennoch von Einzelreaktionen sagen, sie seien rasch oder langsam, so geschieht dies unter Bezugnahme auf die Dauer der menschlichen Handlungen, die

¹¹ A. SKRABAL, Z. physik. Chem. (B) 3 (1929) 247.

¹² Bei Annahme irreversibler Vorgänge gelangt man bei Simultanreaktionen häufig zu Rechenergebnissen, die mit der Erfahrung unvereinbar sind (Siehe § 12).

wir wieder an anderen Zeitphänomenen als Maßstab messen. Unsere Einstellung zu einer chemischen Einzelreaktion ist eine homozentrische.

In der *Welt des chemischen Geschehens* gewinnen die Begriffe rasche und langsame Reaktion, große und geringe Reaktionsgeschwindigkeit erst in Ansehung der *Simultanreaktionen* einen physikalischen Sinn.

§ 3. Die Simultanreaktionen. Ein gegebenes *System von Simultanreaktionen* der Zahl m läßt sich sehr häufig auf eine geringere Zahl n von *unabhängigen Reaktionen* zurückführen. So lassen sich die *vier* Reaktionen der Veresterung einer Dicarbonäure über zwei isomere Halbester zum Neutralester auf *drei* Reaktionen zurückführen¹³. Die unabhängigen Reaktionen sind derart zu wählen, daß sich mit Hilfe ihrer n Umsatzvariablen oder „*Systemvariablen*“ die Konzentrationen *aller* Reaktanten des Systems beschreiben lassen. Das Massenwirkungsgesetz führt alsdann zu folgendem System von n simultanen Differentialgleichungen:

$$\left. \begin{array}{l} x_1' = f_1(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) \\ x_2' = f_2(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) \\ \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ x_n' = f_n(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) \end{array} \right\}$$

die als *Konstante* neben den Anfangskonzentrationen $a, b, c \dots$ noch die $2m$ Koeffizienten aller m Reaktionen, also auch der *abhängigen*, enthalten. Von den n Systemvariablen brauchen nicht notwendig alle in *jeder* der n Differentialgleichungen aufzuscheinen.

Die Vorgänge eines aus n unabhängigen Reaktionen bestehenden Systems können als Einakter, Zweiakter bis n -Akter verlaufen. Am Ende des Gesamtgeschehens steht das *totale Gleichgewicht*, das, je nach der Zahl der *Reaktionsakte*, in einem, zwei bis n Zügen erreicht wird. Zwischen den einzelnen *Reaktionsakten* liegen kürzere oder längere *reaktionslose Pausen*. Die *Reaktionsdauer* der aufeinander folgenden Akte ist *größenordnungsgemäß* verschieden, derart, daß jeder Reaktionsakt zu seinem Ablauf ungleich viel mehr Zeit beansprucht als der *vorhergehende* Akt. Ein weiteres wichtiges Kennzeichen der Mehrakter ist folgendes: Jede *Beziehung zwischen den Reaktanten* des Systems, die mit Ende eines Reaktionsaktes gerade erreicht und also in der unmittelbar darauffolgenden *reaktionslosen Pause*

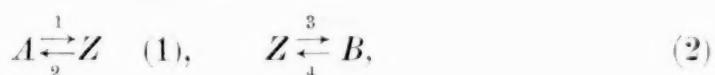
¹³ A. SKRABAL, Rec. Trav. chim. Pays-Bas **56** (1937) 145.

„stehend“ ist, wird in allen folgenden Reaktionsakten zu einer „laufenden Beziehung“.

In dem *Einakter* sind alle Mehrakter *zeitlich zusammengezogen*. Das Zeitgesetz des Einakters ist das Integral der oben stehenden Differentialgleichungen, die Zeitgesetze der Mehrakter sind Degenerierungen des allgemeinen Integrals des Einakters. Die Zeitgesetze der einzelnen Akte eines Mehrakters sind also *einfacher* als das des Einakters. Wegen der großenordnungsmäßigen Verschiedenheit der Reaktionsdauer der Akte eines Mehrakters ist von letzteren häufig nur *ein einziger Akt der Messung* durch den Experimentator *zugänglich*, welchem meßbaren Akte unmeßbar rasche vorausgegangen sein und unmeßbar langsame folgen können.

Im folgenden sollen nur Systeme behandelt werden, für welche $m = n$ ist, die also nur aus *unabhängigen* Simultanreaktionen bestehen. Die Systeme $m > n$ sollen einer späteren Untersuchung vorbehalten bleiben. Je nach dem Werte von n kann man in der Kinetik der Simultanreaktionen von unären, binären, ternären usw. Systemen sprechen. Für $n = 1$ liegt eine *Einzelreaktion* vor. Die bei den Einzelreaktionen dargelegten Begriffe finden auch bei den Simultanreaktionen ihre Nutzanwendung. Ähnlich gelten die bei *binären* Systemen zu beobachtenden Gesetzmäßigkeiten auch für die *höheren* Systeme.

§ 4. Die Zweiakter. Wir betrachten das denkbar *einfachste binäre System*, die beiden Simultanreaktionen:



nach welchen sich aus A der Stoff B über Z als *Zwischenstoff* bildet. Für die laufenden Konzentrationen gilt dann:

$$A = a - x_1, \quad Z = x_1 - x_2, \quad B = b + x_2, \quad (3)$$

wo x_1 und x_2 die Systemvariablen sind. Die simultanen Differentialgleichungen lauten somit:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= k_1(a - x_1) - k_2(x_1 - x_2) \\ \dot{x}_2 &= k_3(x_1 - x_2) - k_4(b + x_2) \end{aligned} \quad (4)$$

Wenn nun die Reaktion (1) *sehr viel rascher* ist als (2), so ist zu Anfang x_2 vernachlässigbar, die Reaktion (1) verläuft in einem Zweiakter als *erster Reaktionsakt allein*, und die Gleichungen (4) degenerieren zu:

$$\dot{x}_1 = k_1(a - x_1) - k_2 x_1 \quad (5)$$

mit dem Integral ($x_1 = 0$ für $t = 0$):

$$x_1 = \frac{k_1 a}{k_1 + k_2} \left\{ 1 - \exp [-(k_1 + k_2) t] \right\}. \quad (6)$$

Gegen Ende dieses ersten Reaktionsaktes ist die RD in (5) eine kleine Differenz geworden, also $k_1(a - x_1) = k_2 x_1$, und die Reaktion (1) im *Gleichgewichte*.

Während der folgenden reaktionslosen Pause hat die Reaktion (2) nun Zeit, sich geltend zu machen, und wenn x_2 nicht mehr zu vernachlässigen ist, setzt der *zweite Reaktionsakt* ein.

Im Zuge des zweiten Aktes ist die Reaktion (1) im „laufenden Gleichgewichte“, somit nach der ersten Gleichung in (4):

$$k_1(a - x_1) = k_2(x_1 - x_2), \quad (7)$$

und die Reaktion (2) geschwindigkeitsbestimmend oder „zeitbestimmend“ (engl. rate determining). Setzen wir den Wert von x_1 aus (7) in die zweite Gleichung von (4), so erhalten wir:

$$x_2' = \frac{k_1 k_3 a - (k_1 + k_2) k_4 b - (k_1 k_3 + k_1 k_4 + k_2 k_4) x_2}{k_1 + k_2} \quad (8)$$

und für das Integral ($x_2 = 0$ für $t = 0$) des *zweiten Aktes*:

$$x_2 = \frac{k_1 k_3 a - (k_1 + k_2) k_4 b}{(k_1 k_3 + k_1 k_4 + k_2 k_4)} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{k_1 k_3 + k_1 k_4 + k_2 k_4}{k_1 + k_2} t \right] \right\}. \quad (9)$$

Da während des zweiten Aktes die Reaktion (1) im laufenden Gleichgewichte ist, ist ihre Geschwindigkeit x_1' eine kleine Differenz. Um ihren Wert zu erfahren, differenzieren wir (7) nach der Zeit und bekommen:

$$x_1' = \frac{k_2}{k_1 + k_2} x_2', \quad (10)$$

worin wir für x_2' seinen Wert nach (8) einzusetzen haben. Wir erhalten derart x_1' als Funktion von x_2 . Die Geschwindigkeit der Reaktion (1) im *laufenden Gleichgewichte* ist somit von der Geschwindigkeit x_2' der *zeitbestimmenden* Reaktion (2) abhängig.

Die Beziehung (10) wirft ihr Licht auf den *Begriff des laufenden Gleichgewichtes*. Allgemein ist $x_1' = k_1 A - k_2 Z$, und da die Reaktion (1) während des zweiten Aktes im *Gleichgewichte* ist, dürfte man an $x_1' = 0$ denken. Andererseits könnte man aus der Sachlage, wonach die Reaktion (1) sehr viel *rascher* verläuft als (2), auf einen sehr *hohen* Wert der Geschwindigkeit x_1' schließen. In der Tat findet man im Schrifttum *beide* Auffassungen (x_1' sehr klein und x_1' sehr groß) vertreten, und *beide* Auffassungen sind gleich *unrichtig*. Im laufenden Gleichgewichte wird der Wert von $x_1' = k_1 A - k_2 Z$ nach den Gleichungen (10) und (8) durch die Geschwindigkeit $x_2' = k_3 Z - k_4 B$ der *anderen* Reaktion bestimmt, denn dividiert man Zähler und Nenner der Brüche in (10) und (8)

etwa durch k_1 , so zeigt sich, daß in den beiden Formeln *nicht* die Geschwindigkeitskoeffizienten der Reaktion (1), sondern nur ihr Verhältnis $k_2:k_1$, also die *Gleichgewichtskonstante* der raschen Reaktion auftritt, die ihrer Dimension nach *zeitfrei* ist.

Weil unser System ein *binäres* ($n=2$) ist, ist mit Ende des zweiten Aktes notwendig *alles* im Gleichgewichte, also auch Gleichgewicht hinsichtlich der Reaktion $A \rightleftharpoons B$.

Den besten Einblick in das Spiel der simultanen Reaktionen gewinnt man durch Ausrechnung von *Zahlenbeispielen*. In der Tabelle 1 ist ein solches für

Tabelle 1.

t	A	Z	B	x'_1	x'_2
0	1.0000	0	0.2	$2 \cdot 10^6$	-0.0020
10^{-10}	0.9998	0.0002	0.2	$1.9994 \cdot 10^6$	-0.0018
10^{-7}	0.8272	0.1728	0.2	$1.4816 \cdot 10^6$	+0.1708
10^{-6}	0.3664	0.6335	0.2	$0.9930 \cdot 10^5$	+0.6315
10^{-5}	0.3333	0.6667	0.2		+0.6647
10^{-3}	0.3331	0.6662	0.2007	0.2214	+0.6642
1	0.1723	0.3446	0.6831	0.1126	+0.3378
10	0.0063	0.0126	1.1811	0.0003	+0.0008
10^2	0.0059	0.0118	1.1823		
∞	0.0059	0.0118	1.1823	0	0

die numerischen Werte $k_1 = 2 \cdot 10^6$, $k_2 = 10^5$, $k_3 = 1$, $k_4 = 10^{-2}$, $a = 1$ und $b = 0.2$ wiedergegeben.

Der Umsatz nach der Reaktion des *ersten* Aktes spielt sich in einem Zeitbereich von etwa 5 Zehnerpotenzen ab, hernach folgt die reaktionslose Pause über 2 Zehnerpotenzen und schließlich der zweite, relativ langsame Akt wieder über 5 Zehnerpotenzen der Zeit. Im ersten Akt ist die Reaktion $A \rightarrow Z$ effektiv, im zweiten Akt sind das „*bruttomäßig*“ die Reaktionen $A \rightarrow B$ und $Z \rightarrow B$, so daß das *Z* durch ein *Maximum* geht. Gegenüber der Reaktionsdauer des zweiten Aktes ist die des ersten verschwindend. Im Zuge des ersten Aktes ist die Partialgeschwindigkeit x'_2 klein gegenüber x'_1 . Während der reaktionslosen Pause sinkt x'_1 auf den millionsten Teil herab. Im zweiten Akte ist x'_1 nach der Beziehung (10) dem x'_2 , welche Teilgeschwindigkeit nunmehr zeitbestimmend ist, proportional. Ein experimenteller (höhermolekularer) Fall wäre etwa die meßbare Reduktion von Jod neben Jodion durch ein Reduzens. Im ersten, unmeßbar raschen Reaktionsakte stellt sich das Trijodiongleichgewicht ein, das während des folgenden meßbaren zweiten Aktes im laufenden Gleichgewichte ist.

Unser Zweiaktter zeigt eine sehr bemerkenswerte *Degenerierung*. Sowie von den Koeffizienten der relativ raschen Reaktion (1) $k_2 \gg k_1$ ist, wird die Reaktion $A \rightarrow Z$ des *ersten Aktes*

nach den in § 2 dargelegten Begriffen zu einer *umsatzlosen Reaktion*. Die weitere Folge ist die, daß im Zuge des *zweiten Aktes* nur mehr $A \rightarrow B$ als *einige Reaktion* von wesentlichem Umsatz statthat. Der Zwischenstoff Z erreicht in keinem der beiden Reaktionsakte eine merkliche Konzentration und ist somit ein *Instabiles* geworden.

Die Geschwindigkeitsgleichung (5) des *ersten Aktes* degeneriert zu:

$$x'_1 = z' = k_1 a - k_2 z, \quad (11)$$

wenn wir die Konzentration des *Instabilen* symbolhaft mit dem *kleinen* Buchstaben z bezeichnen. Gegen *Ende* des ersten Aktes ist die RD in (11) eine kleine Differenz geworden und daher:

$$k_2 z = k_1 a. \quad (12)$$

Während des *zweiten Aktes* ist die Umsatzvariable x_2 der Reaktion (2) zugleich die Umsatzvariable der Reaktion $A \rightleftharpoons B$, die nunmehr „*Bruttoreaktion*“ ist. Ein wesentlicher Umsatz nach der letzteren findet demnach *erst im zweiten Akt statt*, und wird die Umsatzvariable der Bruttoreaktion mit ξ bezeichnet, so ist $x_2 = \xi$, und die zweite Gleichung in (4) wird zu:

$$x'_2 = \xi' = k_3 z - k_4 (b + \xi). \quad (13)$$

Was das x_1 während des *zweiten Aktes* anlangt, so folgt für $k_2 > k_1$ aus der Beziehung (10) $x'_1 = x'_2$ oder $dx_1 = dx_2$ und integriert $x_1 = x_2 + C$, wo, wegen $x_1 = x_2 = 0$ für $t = 0$, die Integrationskonstante C den Wert Null hat. Es gilt somit im *zweiten Akte*:

$$\xi = x_1 = x_2. \quad (14)$$

Setzen wir das in die Gleichung (7) des *laufenden* Gleichgewichtes, so erhalten wir:

$$k_2 z = k_1 (a - \xi), \quad (15)$$

entsprechend dem *stehenden* Gleichgewichte (12). Aus (13) und (15) folgt schließlich für die *Geschwindigkeit der Bruttoreaktion*:

$$\xi' = \frac{k_1 k_3 (a - \xi) - k_2 k_4 (b + \xi)}{k_2}. \quad (16)$$

Der zeitbestimmenden Reaktion (2) des zweiten Aktes ist die Reaktion (1) als „*Gleichgewicht vorgelagert*“, und das Z ist

ein „ARRHENIUSCHER Zwischenstoff“. Man kennt eine Unzahl von Bruttoreaktionen, die den hier dargelegten Gesetzmäßigkeiten unterworfen sind.

Ein *anderer Zweiakter* liegt vor, sowie von den beiden Simultanreaktionen die Reaktion (2) die *relativ raschere* ist. Im ersten, raschen Akte verläuft $B \rightarrow Z$ als effektive Reaktion, im zweiten, relativ langsamem Akte gehen bruttomäßig die Reaktionen $A \rightarrow B$ und $Z \rightarrow B$ vor sich, so daß B ein *Minimum* durchläuft. Die Gesetzmäßigkeiten sind die analogen wie vorhin.

Das Ausmaß des *Umsatzes* nach der Reaktion $B \rightarrow Z$ des *ersten Aktes* ist umso erheblicher, je größer $k_4 b$ ist, und es ist *verschwindend*, wenn k_4 oder b sich der Null nähern. Aber auch für ein *großes* $k_4 b$ verschwindet der erste Reaktionsakt, wenn k_3/k_4 . Alsdann ist Z wieder ein *Instabiles*, die Reaktion $A \rightleftharpoons B$ Bruttoreaktion und das Zeitgesetz der letzteren:

$$\dot{\xi}' = \frac{k_1 k_3 (a - \xi) - k_2 k_4 (b + \xi)}{k_3}. \quad (17)$$

Nunmehr ist dem zeitbestimmenden Vorgang (1) das Gleichgewicht der raschen Reaktion (2) „nachgelagert“ und das Z ist ein „VANT HOFFSCHER Zwischenstoff“. Hierher gehören abermals zahlreiche Bruttoreaktionen, die analog geartet sind.

§ 5. Die Zwischenstoffreaktion. Die Zeitgesetze (16) und (17) mit einem *instabilen* Z sind Grenzfälle der in § 4 behandelten beiden Zweiakter mit *stabilem* Z , zugleich aber auch die Grenzfälle eines *weiteren Zweiakters* mit *instabilem* Zwischenstoff. Die Zweiakter des § 4 waren dadurch gekennzeichnet, daß mit Ende des ersten Aktes *eine* von den beiden Partialgeschwindigkeiten x'_1 und x'_2 eine *kleine Differenz* wurde. Unser *neuer Zweiakter* ist dadurch charakterisiert, daß mit Ende des *ersten Aktes* ($x'_1 - x'_2$) eine *kleine Differenz* wird und also im *zweiten Akte* $x'_1 = x'_2$ gesetzt werden kann. Aus dieser Gleichsetzung folgt nach $Z = x_1 - x_2$ mit Notwendigkeit die *Instabilität* des Zwischenstoffes und aus letzterer die Existenz einer *Bruttoreaktion* $A \rightleftharpoons B$, deren Geschwindigkeit ξ' im zweiten Akte oder dem „*Umsatzakte*“ den Geschwindigkeiten der Partialreaktionen gleichzusetzen ist:

$$\xi' = x'_1 = x'_2. \quad (1)$$

Wir gelangen also auf der Grundlage der *Theorie der Simultanreaktionen mit einem Schlag* und ohne jede Rechnung zum „*Prinzip der Gleichheit der Partialgeschwindigkeiten*“. Dasselbe trifft zwar auch für die Herleitung dieses Prinzipes auf *stöchiometrischer Basis* zu, doch ist der Einblick, den die Theorie der Simultanreaktionen gewährt, ein viel tieferer, da diese Theorie auch über das *zeitliche Werden* der Beziehung (1) genauste Auskunft erteilt.

Zu *Beginn* des Zweiakters gilt allgemein:

$$z' = x'_1 - x'_2 = [k_1(a - x_1) + k_4(b + x_2)] - (k_2 + k_3)z. \quad (2)$$

Weil die Reaktionen des ersten Aktes „umsatzlos“ verlaufen, kann einmal x_1 gegenüber a und für ein *großes* b auch x_2 gegenüber b vernachlässigt werden, für ein *kleines* b wird aber das zweite Glied des Eckklammerausdruck *gegenüber dem ersten verschwindend*, so daß *stets*:

$$z' = [k_1 a + k_4 b] - (k_2 + k_3)z \quad (3)$$

gesetzt werden kann, wodurch die Gleichung *integrierbar* wird.

Mit *Ende des ersten Aktes* ist z' eine kleine Differenz geworden, und alsdann ist:

$$z = \frac{k_1 a + k_4 b}{k_2 + k_3} \quad (4)$$

Diese Beziehung wird im *zweiten Akte* zu einer „laufenden“, so daß in diesem zweiten und letzten Reaktionsakt, der *allein* einen Umsatz aufweist, für die Konzentration des Instabilen gilt:

$$z = \frac{k_1(a - \xi) + k_4(b + \xi)}{k_2 + k_3} \quad (5)$$

und damit für die Geschwindigkeit der Bruttoreaktion:

$$\xi' = \frac{k_1 k_3(a - \xi) - k_2 k_4(b + \xi)}{k_2 + k_3}. \quad (6)$$

Beide Gleichungen folgen natürlich aus dem PGP (1), das die Form annimmt:

$$\xi' = k_1(a - \xi) - k_2 z = k_3 z - k_4(b + \xi). \quad (7)$$

Die Zeitgesetze (16) und (17) des § 4 sind Degenerierungen der allgemeinen Gleichung (6).

Während des zweiten Aktes sind $z = x_1 - x_2$ und $z' = x'_1 - x'_2$ *kleine Differenzen*. Der Wert der ersten folgt nach (5), der der zweiten durch Differentiation dieser Gleichung nach der Zeit zu:

$$z' = - \frac{k_1 - k_4 \xi'}{k_2 + k_3} \quad (8)$$

wo für ξ' sein Wert nach (6) einzusetzen ist.

Für $k_1 > k_4$ nimmt also z im Verlaufe des *zweiten* Aktes *ab*, für $k_1 < k_4$ nimmt es *zu*. Da aber im *ersten* Akte z *stets zunimmt*, geht während des *Gesamtverlaufes* das z für $k_1 > k_4$ durch ein Maximum und für $k_1 < k_4$ steigt es monoton an. Die gleichen Erscheinungen gelten auch für ein stabiles Z .

Der Umsatz nach der *Bruttoreaktion* $A \rightleftharpoons B$ wird an ihrer *Umsatzvariablen* ξ gemessen. Er tritt nach dem Rechenergebnis erst im *zweiten* Reaktionsakte in Erscheinung. Vor ihm fällt zeitlich der relativ kurze¹⁴ und „umsatzlose“ erste Akt als „*Einleitungsperiode*“. Mit Ablauf der letzteren ist der „*stationäre Zustand*“¹⁵ erreicht, der durch die Beziehung (1) und ihre Folgerungen (5), (6) und (8) gekennzeichnet ist. Die reaktionslose Pause fällt bereits in die „*Stationaritätsperiode*“. Letztere währt vom „*Stationaritätszeitpunkte*“, der also mit dem Ende des ersten Aktes zusammenfällt, bis *Ende der Reaktion* oder $t = \infty$. Die „*Stationaritätsbeziehung*“ ist während der Stationaritätsperiode ebenso „*laufend*“ wie das *laufende Gleichgewicht* des zweiten Aktes der Zweiakter des § 4. Letzteres entspricht nach $k_1 A = k_2 Z$ dem *Gleichgewicht* einer *chemischen Reaktion*, erstere nach $k_1 A + k_4 B = (k_2 + k_3) z$ einer Beziehung, die den *Zustand* zwischen den Reaktanten *zweier Reaktionen* regelt. Beide Beziehungen haben das *gemeinsam*, daß sie, einmal erreicht, auch

Tabelle 2.

t	A	B	$10^7 z$	$10^6 x_1'$	x_2'	z'
0	1	0'1	0	1'200	$-2'40 \cdot 10^{-13}$	$+1'200 \cdot 10^{-6}$
10^{-4}	1	0'1	0'0012	1'199	$+2'40 \cdot 10^{-13}$	$+1'198 \cdot 10^{-6}$
10^{-2}	1	0'1	0'1131	1'087	$+2'23 \cdot 10^{-8}$	$+1'064 \cdot 10^{-6}$
10^{-1}	1	0'1	0'6988	0'5012	$+1'398 \cdot 10^{-7}$	$+3'614 \cdot 10^{-7}$
1	1	0'1	1			
10^0	0'9998	0'1002	0'9998	0'1999	$+1'999 \cdot 10^{-7}$	$-2'00 \cdot 10^{-14}$
10^1	0'8185	0'2815	0'8185	0'1637	$+1'637 \cdot 10^{-7}$	$-1'74 \cdot 10^{-14}$
10^2	0'1353	0'9647	0'1353	0'0270	$+0'270 \cdot 10^{-7}$	$-0'27 \cdot 10^{-14}$
10^3	$1'1 \cdot 10^{-5}$	$1'1000$	$1'32 \cdot 10^{-5}$			
∞	$1'1 \cdot 10^{-5}$	$1'1000$	$1'32 \cdot 10^{-5}$	0	0	0

¹⁴ J. A. CHRISTIANSEN in G. M. SCHWAB, Handbuch der Katalyse Bd. 1 (Wien 1941) 257, spricht von „wenigen Sekunden oder Minuten“. Tatsächlich handelt es sich um *relative* Zeiten. Daher kann bei Reaktionen, die in geologischen Zeiten ablaufen, die Einleitungsperiode auch tausend Jahre währen.

¹⁵ Man sagt sehr häufig auch „quasistationär“, nach meiner Meinung genügt „stationär“.

dann erhalten bleiben, wenn in der Folge die Konzentrationen dieser Beziehungen mit der Zeit veränderlich werden (siehe § 3).

Ferner kann die Stationaritätsbeziehung in eine Gleichgewichtsbeziehung übergehen. So wird unsere Stationaritätsbeziehung für ein $k_1 A \gg k_4 B$ und $k_2 \gg k_3$ zu $k_1 A = k_2 z$ oder dem laufenden Gleichgewicht eines Arrhenius'schen Zwischenstoffes.

Ich gebe zwei Zahlenbeispiele, eines mit $k_1 > k_4$ (Tabelle 2), das andere mit $k_1 < k_4$ (Tabelle 3) wieder. In beiden Beispielen ist $a = 1$ und $b = 0.1$, ferner:

	k_1	k_2	k_3	k_4
$k_1 > k_4$	$1.2 \cdot 10^{-6}$	10	2	$2.4 \cdot 10^{-12}$
$k_1 < k_4$	10^{-6}	10^{-6}	1	$2 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 3.

t	A	B	$10^6 z$	$10^6 x_1$	$10^6 x_2'$	z'
0	1	0.1	0	1	-0.2000	$1.2000 \cdot 10^{-6}$
10^{-4}	1	0.1	0.00012	1	-0.1999	$1.1999 \cdot 10^{-6}$
10^{-2}	1	0.1	0.0120	1	-0.1880	$1.1880 \cdot 10^{-6}$
10^{-1}	1	0.1	0.1142	1	-0.0858	$1.0858 \cdot 10^{-6}$
1	1	0.1	0.7585	1	+0.5585	$0.4415 \cdot 10^{-6}$
10^0	0.9999	0.1001	1.2001	0.9999	+0.9999	$0.9999 \cdot 10^{-12}$
10^1	0.9048	0.1952	1.2952	0.9048	+0.9048	$0.9048 \cdot 10^{-12}$
10^2	0.3679	0.7321	1.8321	0.3679	+0.3679	$0.3679 \cdot 10^{-12}$
10^8	$2.2 \cdot 10^{-6}$	1.1000	2.2000			
∞	$2.2 \cdot 10^{-6}$	1.1000	2.2000	0	0	0

Das Bild der beiden Zweikäter ist bis auf die relativen Mengen von Z gegenüber A und B dasselbe wie das, das die Zweikäter des § 4 boten. Der Gesamtvorgang spielt sich über einen Bereich von 12 Zehnerpotenzen ab, wobei je 5 Zehnerpotenzen der Zeit auf die beiden Akte entfallen. Wesentlich ist die Gleichheit von x_1' und x_2' während des zweiten Aktes oder des „Umsatzaktes“.

§ 6. Das Übergangsprinzip. Wenn die im Verlaufe des zweiten Reaktionsaktes geltenden laufenden Beziehungen (laufende Gleichgewichte bzw. Stationaritätsbeziehungen) durch irgendwelche Eingriffe von außen gestört werden, so stellen sich dieselben immer wieder von neuem ein, und zwar mit einer Geschwindigkeit, der gegenüber die Geschwindigkeit des zweiten Aktes verschwindend gering ist. An einem Zahlenbeispiel möge das gezeigt werden. Wir wollen uns also vorstellen, daß wir, etwa im Falle der Reaktion der Tabelle 2, zur Zeit $t = 10^6$ des zweiten Aktes, in welchem Zeitpunkt $A = 0.8185$, $B = 0.2815$ und

$\gamma = 0.8185 \cdot 10^{-7}$ ist, unter Aufrechterhaltung der Instabilität des Zwischenstoffes ($A + B \rightleftharpoons z$), von den drei Reaktanten so viel zugeben oder wegnehmen, daß die Stationaritätsbeziehung (5) in § 5 gestört wird. In diesem *Augenblicke*, den wir zum Nullpunkt einer *neuen Zeitzählung* ϑ machen, möge sein $A = z = 1$, $B = \beta = 0.1$ und $z = \gamma = 2 \cdot 10^{-7}$. Zu einer beliebigen Zeit ϑ ist dann $A = z - x_1$, $B = \beta + x_2$ und $z = \gamma + x_1 - x_2$ und daher:

$$z' = [k_1(z - x_1) + k_4(\beta + x_2)] - (k_2 + k_3)z.$$

Abermals können wir für den Zweck der Integration x_1 gegenüber z und x_2 gegenüber β vernachlässigen und erhalten so:

$$z = \frac{k_1 z + k_4 \beta}{k_2 + k_3} + \left[\gamma - \frac{k_1 z + k_4 \beta}{k_2 + k_3} \right] \exp[-(k_2 + k_3)\vartheta].$$

Zu jener Zeit ϑ , zu welcher das zweite Glied gegenüber dem ersten eben vernachlässigt werden kann, ist der *stationäre Zustand* wieder erreicht. Aus der Tabelle 4 geht hervor, daß dies bereits zur Zeit $\vartheta = 1$ der Fall ist.

Tabelle 4.

t	ϑ	$\exp[-(k_2 + k_3)\vartheta]$	$10^7 z$
$10^6 + 0$	0	1	2
$10^6 + 10^{-4}$	10^{-4}	0.9988	1.9988
$10^6 + 10^{-3}$	10^{-3}	0.9881	1.9881
$10^6 + 10^{-2}$	10^{-2}	0.8869	1.8869
$10^6 + 10^{-1}$	10^{-1}	0.3012	1.3012
$10^6 + 1$	1	0.0000	1.0000

Die bis zur Wiedereinstellung der Stationaritätsbeziehung verstreichende Zeit 1 ist also gegenüber 10^6 *verschwindend*, so daß während der letzteren ein merklicher Umsatz nach der Bruttoreaktion $A \rightleftharpoons B$ nicht statthaben und $A = z$ und $B = \beta$ *konstant* gesetzt werden kann. Die derart wieder hergestellte Stationaritätsbeziehung zwischen den Reaktanten gilt *in der Folge* auch für die mit ξ *variablen* Konzentrationen der Stabilen.

Von diesem Prinzip, das ich „Übergangsprinzip“ benannt habe, und das notwendig aus der relativen Verschiedenheit der Geschwindigkeiten der Reaktionen der Einleitungsperiode und der Stationaritätsperiode fließt, soll später Anwendung gemacht werden.

Mehraktreaktionen mit laufenden Gleichgewichten und stationären Beziehungen, ihre zeitweiligen, meistens in regelmäßigen Zeitabständen erfolgenden Störungen und alsbaldigen Wiederherstellungen, verlaufen auch im *lebenden Organismus*. In dieser Hinsicht berühren sich meine Darlegungen mit jenen von L. VON BERTALANFFY¹⁶.

Weil unsere Simultansysteme *binär* sind ($n=2$), endet der zweite Reaktionsakt notwendig im *totalen chemischen Gleichgewichte*. Die Richtungsdifferenz in ξ' nach Gleichung (6) des § 5 ist dann eine *kleine* und daher gilt:

$$k_1 k_3 A = k_2 k_4 B$$

und damit für das *Instabile* nach (5):

$$z = \frac{k_1 A}{k_2} = \frac{k_4 B}{k_3}$$

als *Gleichgewichtsbeziehung*.

Wenn hingegen k_2 oder k_4 sich der *Null* nähern, wird die Bruttoreaktion *irreversibel* im Sinne des § 2, und das Reaktionspiel setzt im zweiten Akte mit den Beziehungen ein, mit denen es auch *endet*:

$$z = \frac{k_1 A + k_4 B}{k_3} \quad (k_2 = 0)$$

$$z = \frac{k_1 A}{k_2 + k_3} \quad (k_4 = 0)$$

$$z = \frac{k_1 A}{k_3} \quad (k_2 = k_4 = 0),$$

und die als „*Grenzzustände*“ (engl. steady state) bezeichnet werden können. Sie treten *an Stelle* des chemischen Gleichgewichtes¹⁷.

§ 7. Der Einakter. Sein Zeitgesetz sind nach den Gleichungen (4) in § 4 die *simultanen* Differentialgleichungen:

$$\begin{aligned} x'_1 &= k_1 a - (k_1 + k_2) x_1 + k_2 x_2 \\ x'_2 &= k_3 x_1 - (k_3 + k_4) x_2 - k_4 b \end{aligned}$$

Sie lassen sich, wie alle Systeme monomolekularer Reaktionen, in geschlossener Form integrieren, entweder nach dem Verfahren von R. WEGSCHEIDER, das von mir verallgemeinert wurde, oder nach der Methode von A. RAKOWSKI. Von diesen Berechnungen sagt H. J. SCHUMACHER¹⁸, daß sie für eine *offene* Folge unvollständiger (reversibler) Reaktionen von RAKOWSKI, für geschlossene Folgen von WEGSCHEIDER durchgeführt wurden. Das ist *nicht* zutreffend. *Beide* Verfahren gelten für *n unabhängige Reaktionen*, gleichgültig, ob ihr System aus einer

¹⁶ L. VON BERTALANFFY, Naturwiss. 28 (1940) 521.

¹⁷ Literatur bei A. SKRABAL, Homogenkinetik (Dresden 1941) 177.

¹⁸ H. J. SCHUMACHER, Chemische Gasreaktionen (Dresden und Leipzig 1938) 8.

offenen Folge ($m = n$) besteht oder auch geschlossene Folgen ($m > n$) aufweist (siehe § 3). Der Unterschied liegt allein darin, daß sich nach WEGSCHEIDER die Zeit, nach RAKOWSKI die *Umsatzvariablen* explizit darstellen.

Das *Integral* der Gleichungen enthält als einzige zeitabhängige Glieder *zwei e*-Potenzen der Form $e^{-\varphi t}$, wo das φ die *beiden* Wurzeln der quadratischen Gleichung:

$$\begin{array}{l} \varphi^2 - z\varphi + \beta = 0 \\ z = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 \\ \beta = k_1 k_3 + k_1 k_4 + k_2 k_4 \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right.$$

sind. Daß die Gleichung in φ vom Grade 2 ist, entspricht der Zahl $n = 2$ der unabhängigen Stoffvariablen oder Systemvariablen

Wenn die beiden Simultanreaktionen *auch im Experimente gleichzeitig* verlaufen, so sind die beiden Wurzeln φ_1 und φ_2 von *gleicher* oder *ähnlicher* Größenordnung, und es liegt der *Einakter* vor. Sind sie *größenordnungsmäßig verschieden*, dann sind im *Experimente* zwei Vorgänge *zeitlich auseinandergezogen*, der *Gesamtvorgang* verläuft in *zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Zügen* oder als *Zweiakter*.

Im letzteren Falle degeneriert die quadratische Gleichung zu den beiden linearen $z - \alpha = 0$ und $\alpha\varphi - \beta = 0$ mit den Wurzeln $\varphi_1 = \alpha$ und $\varphi_2 = \beta : \alpha$. Das φ_1 entspricht der relativ *raschen* Geschwindigkeit des *ersten*, das viel kleinere φ der relativ *geringen* Geschwindigkeit des *zweiten* Reaktionsaktes. Mit der Degenerierung der quadratischen Gleichung ist die der Werte von z und β verknüpft. Sie lauten:

$$\begin{array}{ll} \alpha & \beta \\ k_1 + k_2 & k_1 k_3 + k_1 k_4 + k_2 k_4 \\ k_3 + k_4 & k_1 k_3 + k_1 k_4 + k_2 k_4 \\ k_2 + k_3 & k_1 k_3 + k_2 k_4 \end{array}$$

Man erkennt in den Werten von $\varphi_1 \gg \varphi_2$ sofort die jeweilig zeitbestimmenden *e*-Potenzen unserer *drei* in den §§ 4 und 5 behandelten *Zweiakter* und ihrer *Grenzfälle*.

Das Integral der simultanen Differentialgleichungen des Einakters ist daher die *allgemeinste Lösung des Problems*, aus der die einfacheren Integrale der Zweiakter als Grenzfälle hervorgehen. Die Rechenaufgabe, die die Mehrakter stellen, ist also immer eine *einfachere* als die, vor welche man bei Berechnung des Einakters gestellt ist. Das fällt namentlich dann ins Gewicht, wenn die Zahl der simultanen Differentialgleichungen des Einakters *groß* und die Ordnung der Einzelreaktionen eine *höhere* ist.

§ 8. Das Prinzip der Gleichheit der Partialgeschwindigkeiten. Im Rahmen des in § 1 gestellten Problems interessieren uns hier **nur** die *Mehrakter*, die zu *einer* und nur einer *Bruttoreaktion* führen. Das ist bei n vorliegenden Simultanreaktionen

dann der Fall, wenn mit Ende der umsatzlosen *Einleitungsperiode* die $(n-1)$ Differenzen:

$$(x'_1 - x'_2), (x'_2 - x'_3), \dots, (x'_{n-1} - x'_n)$$

alle *kleinen Differenzen* geworden sind. Die n Partialgeschwindigkeiten müssen daher in der Stationaritätsperiode, die allein einen *Umsatz* aufweist, untereinander gleich und gleich der Geschwindigkeit ξ' der Bruttoreaktion sein:

$$\xi' = x'_1 = x'_2 = x'_3 = \dots = x'_n; \quad (1)$$

Das ist das PGP, das wir also aus der *Theorie der Simultanreaktionen* hergeleitet haben. Aus der *Stöchiometrie* der Einzelreaktionen und der der Bruttoreaktion folgt:

$$\xi = x_1 = x_2 = x_3 = \dots = x_n, \quad (2)$$

welche Beziehungen durch Differentiation nach der Zeit das PGP ergeben. Die Beziehung (1) enthält n Gleichungen, nach denen wir $(n-1)$ Konzentrationen von Instabilen und die Bruttogeschwindigkeit ξ' berechnen können.

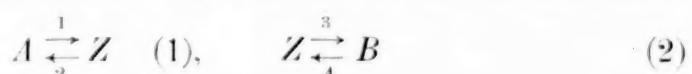
Die *Stationaritätsperiode* ist umsatzmäßig der *letzte Akt* eines Mehrakters, und mit ihrem Abschluß muß notwendig das *totale Gleichgewicht* erreicht sein. Letzteres involviert auch das *Gleichgewicht* der Bruttoreaktion. Daher muß das nach (1) berechnete ξ' die *Richtungsdifferenz* der Bruttoreaktion enthalten, und weil letztere *nicht direkt*, sondern der Annahme gemäß allein über die Zwischenreaktionen verläuft, muß die Richtungsdifferenz der Bruttoreaktion die Geschwindigkeitskoeffizienten der Teilreaktionen führen. Neben der Richtungsdifferenz der Bruttoreaktion enthält der Ausdruck für ξ' oder das Zeitgesetz $\xi' = f(\xi)$ der Bruttoreaktion stets auch ein *faktorielles Glied*, das notwendig *positiv* ist. In diesem Glied sind neben Koeffizienten der Teilreaktionen in der Regel auch Konzentrationen der Stabilen enthalten, und da sich nicht nur die absoluten, sondern auch die relativen Werte desselben im Zuge der Bruttoreaktion ändern, einzelne Ausdrücke gegenüber anderen verschwindend klein werden können, kann im Experimente das Phänomen des „*Zeitgesetzeswechsels*“ beobachtet werden.

Bruttoreaktionen im stationären Zustande — und nur im letzteren weisen sie einen Umsatz auf — verhalten sich daher ihrem *Zeitgesetze* $\xi' = f(\xi)$ nach wie *Urreaktionen* [Zeitgesetz $x' = f(x)$], sie bilden gewissermaßen eine *höhere (komplexe) Einheit von einfachen Reaktionen*, mit ihrer Bruttogeschwindigkeit ξ' können sie in Konkurrenz mit anderen Bruttoreaktionen und Urreaktionen treten und mit ihnen weitere Systeme von Simultanreaktionen bilden¹⁹.

¹⁹ A. SKRABAL, Z. Elektrochem. **48** (1942) 314.

Von den Partialgeschwindigkeiten in (1) können einzelne *laufende Gleichgewichte* sein, wodurch sich das Zeitgesetz $\xi' = f(\xi)$ vereinfacht. Wenigstens eine der Partialgeschwindigkeiten muß aber von ihrem Gleichgewichte *entfernt* und diese eine Reaktion also zeitbestimmend sein, weil ansonst *alles* im Gleichgewicht und $\xi' = 0$ wäre. Wenn darüber hinaus diese *eine* Reaktion noch *irreversibel* ist, so resultiert das denkbar *einfachste* Zeitgesetz der Bruttoreaktion. Dieser Fall einer *einzig* zeitbestimmenden irreversiblen Reaktion ist im Experimente sehr häufig verwirklicht. Wegen der Einfachheit ihrer Zeitgesetze sind die hiehergehörigen Bruttoreaktionen und ihre Zeitgesetze relativ frühzeitig entdeckt und gedeutet worden.

§ 9. Die übliche Betrachtungs- und Rechenweise. Sie soll gleichfalls an dem einfachsten System von Simultanreaktionen:



dargelegt werden, wobei gleich vorausgeschickt werden möge, daß sie dadurch gekennzeichnet ist, daß sie nur mit *Konzentrationen* und nicht mit Umsatzvariablen operiert. In der Tat liegen dicke Bücher reaktionskinetischen Inhalts vor, in denen man vergeblich nach dem Begriff der Umsatzvariablen sucht.

Für den stationären Zustand wird nun *postuliert*:

$$z' = (k_1 A + k_4 B) - (k_2 + k_3) z = 0 \quad (3)$$

woraus folgt:

$$z = \frac{k_1 A + k_4 B}{k_2 + k_3}. \quad (4)$$

Die Gleichung ist *identisch* mit unserer Gleichung (5) in § 5 und aus ihr berechnet sich:

$$-\frac{dA}{dt} = \frac{dB}{dt} = \frac{k_1 k_3 A - k_2 k_4 B}{k_2 + k_3}, \quad (5)$$

identisch mit unserer Gleichung (6) in § 5.

Nach (3) soll z *konstant* sein, aus dem Rechenergebnis (4) geht aber hervor, daß es mit A und B *variabel* ist. Wenn man aber nur für *kleine* Intervalle die Konstanz von z annimmt, so darf man die hieraus folgende Beziehung (4) *nicht* in eine Gleichung setzen, die wie (5) für das ganze große *Intervall* vom Augenblick der Stationärwerdung an bis $t = \infty$ gelten soll.

In der Tat wird aber bei der Berechnung von z gar nicht von $z' = 0$ Gebrauch gemacht, sondern nur davon, daß im stationären Zustande $k_1 A + k_4 B = (k_2 + k_3) z$ als laufende Beziehung gesetzt werden kann. Der *Beweis* hiefür wurde allerdings erst von mir erbracht.

Neben $z' = 0$ oder der *Konstanz* von z wird nach einer *weiteren Betrachtungsweise* angenommen, daß im stationären Zustande die Geschwindigkeit der *Bildung* des Instabilen der Geschwindigkeit seiner *Abreaktion* gleichgesetzt werden kann. Diese Auffassung ist *richtig* und mit dem PGP *identisch*, indem die Bildungsgeschwindigkeit durch $x'_1 = k_1 A - k_2 z$ und die Geschwindigkeit der Abreaktion durch $x'_2 = k_3 z - k_4 B$ gegeben ist. Der *Beweis* hiefür wurde ebenfalls erst von mir erbracht. Von M. BODENSTEIN²⁰ wurde die Gleichheit der beiden Geschwindigkeiten wieder nur *postuliert* und überdies in das Gewand von Gleichungen gekleidet, die einer *Kritik nicht standhalten*.

Für die Bildungsgeschwindigkeit des Instabilen wird nämlich gesetzt:

$$+ \frac{dz}{dt} = k_1 A + k_4 B \quad (6)$$

und für die Geschwindigkeit seiner Abreaktion:

$$- \frac{dz}{dt} = (k_2 + k_3) z. \quad (7)$$

Aus der *Gleichsetzung* der beiden:

$$+ \frac{dz}{dt} = - \frac{dz}{dt} \quad (8)$$

folgt dann wieder (4) und hieraus abermals die Gleichung (5).

Nun habe ich bereits im Jahre 1927 einmal darauf verwiesen, daß die Gleichung (8) für ein dz/dt , das von Null verschieden ist, *mathematisch unmöglich* ist, und ferner darauf, daß in (6) und (7) mit ein und demselben Differentialquotienten *zwei verschiedene Geschwindigkeiten* bezeichnet werden, die überdies *physikalisch unmöglich* sind²¹. Kleidet man physikalische Unmöglichkeiten in Sätze der Wortsprache, so erhält man *Konjunktivsätze*. So ist (6) die Bildungsgeschwindigkeit des *Zwischenstoffes*, die zu beobachten *wäre*, wenn er sich *nur bilden würde*, und (7) seine Zerfallsgeschwindigkeit, die dann festzustellen *wäre*, wenn er *nur wegreaktieren würde*. Ich habe daher damals vorgeschlagen, die *Nichtidentität* der beiden Zeitableitungen *symbolisch*, etwa durch zwei entgegengesetzt weisende Pfeile, zum Ausdruck zu bringen, so daß die Gleichung (8) die Form:

$$+ \frac{dz}{dt} = - \frac{dz}{dt} \quad (9)$$

²⁰ M. BODENSTEIN, Z. physik. Chem. **120** (1926) 139.

²¹ A. SKRABAL, Ann. Physik [4] **84** (1927) 624.

annimmt. Seitens der Gegenseite wurde diesem Vorschlag inzwischen, wenn auch nur stillschweigend, zugestimmt, denn W. JOST²² setzt:

$$\left(\frac{dz}{dt}\right)_+ = \left(\frac{dz}{dt}\right)_- \quad (10)$$

und H. J. SCHUMACHER²³ gibt den beiden Zeitableitungen in (8) den *Index* „entstehend“ bzw. „verschwindend“.

Was von *gegenläufigen*, reziproken oder inversen Reaktionen im *Experimente* gemessen wird, ist stets die *Totalgeschwindigkeit*, und setzen wir für letztere mit den *Klassikern*²⁴:

$$\frac{dz}{dt} = k_1 A + k_4 B - (k_2 + k_3) z, \quad (11)$$

so kann diese Geschwindigkeit im stationären Zustande sowohl positive (Tabelle 3), als auch negative (Tabelle 2) Werte annehmen, doch ist sie stets eine *kleine Differenz*, womit abermals wird:

$$(k_2 + k_3) z = k_1 A + k_4 B. \quad (12)$$

Der den Gleichungen (6), (7) und (8) zugrundeliegende *Gedanke* ist vollkommen richtig. Die *mathematische Fassung* der ersten lautet jedoch ganz *anders*, nämlich:

$$x'_1 = k_1 A - k_2 z \quad (6^*)$$

$$x'_2 = k_3 z - k_4 B \quad (7^*)$$

$$x'_1 = x_2 \quad (8^*),$$

auf welche Fassung die BODENSTEINsche *Schule* gar nicht kommen konnte, und zwar darum nicht, weil sie allein mit den Stoffkonzentrationen, nicht aber mit Umsatzvariablen operiert. Die Zerlegung von Größen, die sich aus Konstanten und Variablen zusammensetzen, in letztere, ist aber die unerlässliche Voraussetzung für die *mathematische* Behandlung einer Aufgabe der Infinitesimalrechnung. Das gilt bereits für die denkbar einfachste Kinetik, für die der irreversiblen Reaktion $A \rightarrow B$. Für letztere kann der *Chemiker* wohl schreiben $B' = kA$. Der *Mathematiker* vermag aber mit dieser Gleichung *nichts* anzufangen. Erst wenn man ihm auch mitteilt, daß $A = a - x$ und $B = b + x$

²² W. JOST in G. M. SCHWAB, Handbuch der Katalyse I (Wien 1941) 120.

²³ H. J. SCHUMACHER, Chemische Gasreaktionen (Dresden 1938) 415, 422.

²⁴ Vgl. z. B. J. H. van't HOFF, Vorlesungen I (Braunschweig 1898) 199; W. OSTWALD, Lehrbuch der allgem. Chemie, 2. Aufl. II, 2 (Leipzig 1896) 251, 255.

ist, wodurch aus der Gleichung des Chemikers die Gleichung $x = k(a - x)$ des Mathematikers wird, vermag er mit ihr zu operieren.

Man könnte nun nach den *Variablen* fragen, die man einführen müßte, um mit ihrer Hilfe die Beziehung (9) bzw. (10) unter Vermeidung *ad hoc* eingeführter symbolischer Zeichen in ein Gewand zu kleiden, das nur die in der Infinitesimalrechnung *üblichen* Symbole enthält. Das ist allein möglich, wenn man mit der Bodensteinischen Schule den *beiden* zum Gleichgewicht einer Einzelreaktion führenden *inversen Reaktionen* eine Sonderexistenz und damit je eine *eigene* Umsatzvariable zulegt. Diese Praxis hat sich in der erwähnten Schule derart eingebürgert, daß auch reversible *Bruttovorzüge* als *gesonderte* Reaktionen aufgefaßt und behandelt werden²⁵. Sie nimmt allein Anscheine nach ihren Ausgang von den an dem Begriff der Kettenreaktionen entwickelten Vorstellungen. So wird z. B. die Reaktion $\text{Br}_2 \rightleftharpoons 2 \text{ Br}$ in die *beiden* Reaktionen $\text{Br}_2 \rightarrow 2 \text{ Br}$ und $2 \text{ Br} \rightarrow \text{Br}_2$ *aufgespalten*, die erste als Startreaktion, die zweite als Kettenabbruchreaktion hingestellt, beiden also ein Sonderdasein zugeschrieben.

Nach der *klassischen* Kinetik ist bekanntlich:

$$[\text{Br}_2] = a - x$$

$$[\text{Br}] = b + 2x$$

wo x die Umsatzvariable der *reversiblen* Reaktion $\text{Br}_2 \rightleftharpoons 2 \text{ Br}$ ist. Nach der Auffassung der Bodensteinischen Schule müßte der Hinreaktion $\text{Br}_2 \rightarrow 2 \text{ Br}$ die Umsatzvariable y_1 , der Rückreaktion $2 \text{ Br} \rightarrow \text{Br}_2$ die Variable y_2 zugelegt werden, so daß wird:

$$[\text{Br}_2] = a - y_1 + y_2 = a - (y_1 - y_2)$$

$$[\text{Br}] = b + 2y_1 - 2y_2 = b + 2(y_1 - y_2)$$

Man sieht sofort, daß $y_1 - y_2 = x$ ist, daß also nur *eine* Systemvariable vorliegt, somit nur ein *Einakter* möglich ist, und x nicht *zu degenerieren vermag*²⁶. Was also im Experimente gemessen werden kann, ist immer nur die *Totalgeschwindigkeit* der gegenläufigen Reaktionen. Die *Einzelreaktionen* eines reversiblen Reaktionspaars haben im Makroexperimente *kein* gesondertes Dasein, von ihnen ist in einem gegebenen Zeitpunkte immer *nur eine effektiv*, entweder vermehrt sich Br auf Kosten von Br_2 oder umgekehrt. Das sind förmliche Selbstverständlichkeiten, der Hinweis auf letztere erscheint mir jedoch in Ansehung der Verstöße, die gegen sie begangen werden, nicht überflüssig. Die begrifflichen Schwierigkeiten, die die klassische chemische Dynamik bietet, dürfen offenbar nicht unterschätzt werden.

Analog wie die Reaktion $\text{Br}_2 \rightleftharpoons 2 \text{ Br}$ könnten wir auch die beiden Reaktionen unseres binären Systems in die vier Reaktionen $A \xrightarrow{1} Z$, $Z \xrightarrow{2} A$, $Z \xrightarrow{3} B$ und $B \xrightarrow{4} Z$ mit den Umsatzvariablen y_1 bis y_4 aufspalten. Die Beziehungen zwischen den letzteren und unseren Systemvariablen x_1 und x_2 gingen dann aus:

²⁵ Vgl. etwa H. J. SCHUMACHER, *Chemische Gasreaktionen* (Dresden 1938) 445; M. BODENSTEIN und W. JOST in G. M. SCHWAB, *Handb. der Katalyse I* (Wien 1941) 313.

²⁶ A. SKRABAL, „Von der Sprache der chemischen Reaktionsgleichungen“ im *Jahrbuch der Universität Graz* (Graz 1940) 216.

$$A = a - y_1 + y_2 = a - (y_1 - y_2) = a - x_1$$

$$B = b + y_3 - y_4 = b + (y_3 - y_4) = b + x_2$$

$$z = y_1 - y_2 + y_3 - y_4 = (y_1 - y_2) - (y_3 - y_4) = x_1 - x_2$$

hervor, wonach also $y_1 - y_2 = x_1$ und $y_3 - y_4 = x_2$ ist. Würden wir hingegen die vier y in der Gleichung für z so teilen, daß

$$z = (y_1 + y_4) - (y_2 + y_3),$$

so würde die Beziehung:

$$\frac{d(y_1 + y_4)}{dt} = \frac{d(y_2 + y_3)}{dt}$$

der Gleichung (9) bzw. (10) entsprechen. Zum Unterschied von $y_1 - y_2$ und $y_3 - y_4$ können $y_1 + y_4$ und $y_2 + y_3$ nicht durch die Systemvariablen x_1 und x_2 ausgedrückt werden und haben daher auch keinen physikalischen Sinn.

Die übliche *Rechenweise* führt also in dem angezogenen Falle zur *richtigen Lösung* der Rechenaufgabe, die übliche *Betrachtungsweise* ist aber *unhaltbar*. Die *Deutung* der üblichen Rechenweise fließt aus der Theorie der Simultanreaktionen.

In anderen Fällen liefert die übliche *Rechenweise* nur *mögliche Teillösungen*. Wie bereits in § 1 vorausgeschiekt wurde, trifft dies für das Phänomen der „*Spurenkatalyse*“ zu.

Nicht anwendbar ist die übliche Rechenweise, wenn *mehrere* Bruttoreaktionen vorliegen und im Zuge des chemischen Geschehens *Stabile* und *Instabile* ihre Rollen *tauschen*. Alsdann führt die allgemeine Theorie der Simultanreaktionen allein zum Ziele²⁷.

§ 10. Spurenkatalyse. Wir wählen abermals das denkbar einfachste Beispiel, das System der Teilreaktionen:



mit den Umsatzvariablen x_1 und x_2 . Je nachdem ob x'_1 , x'_2 oder $(x'_1 - x'_2)$ zuerst kleine Differenzen werden, sind abermals *drei* Zweiaakter möglich. Uns interessiert nur der Zweiaakter, der im ersten Akte stets „umsatzlos“ ist, womit Z ein *Instabiles* wird. Alsdann ist:



Bruttoreaktion und *R Katalysator* derselben. Die drei Reaktionsgleichungen stehen zueinander nach:

²⁷ Vgl. A. SKRABAL, Z. Elektrochem. **48** (1942) 314.

$$(1) = (1) + (2) \quad (3)$$

in Beziehung, und während der Stationaritätsperiode ist $x_1 = x_2 = \xi$, wo ξ die Umsatzvariable der Bruttoreaktion (1) ist. Es gilt also für die Konzentrationen:

$$\left. \begin{array}{l} A = a - x_1 = a - \xi \\ B = b + x_2 = b + \xi \end{array} \right| \quad \left. \begin{array}{l} z = x_1 - x_2 \\ R = r - x_1 + x_2 = r - z \end{array} \right| \quad (4)$$

und somit für die Bruttogeschwindigkeit:

$$\xi' = k_1 A (r - z) - k_2 z = k_3 z - k_4 B (r - z). \quad (5)$$

Hieraus berechnet sich:

$$\left. \begin{array}{l} z = \frac{r(k_1 A + k_4 B)}{(k_2 + k_3) + (k_1 A + k_4 B)} \\ R = \frac{r(k_1 + k_3)}{(k_2 + k_3) + (k_1 A + k_4 B)} \\ \xi' = \frac{r(k_1 k_3 A - k_2 k_4 B)}{(k_2 + k_3) + (k_1 A + k_4 B)} \end{array} \right\} \quad (6)$$

worin $A = a - \xi$ und $B = b + \xi$ ist. Wir haben somit alle Konzentrationen aus den Anfangskonzentrationen a , b und r und der Umsatzvariablen ξ dargestellt. Die Bruttogeschwindigkeit ist abermals von der Form $\xi' = f(\xi)$. Sie enthält neben der Richtungsdifferenz $k_1 k_3 A - k_2 k_4 B$ ein faktorielles Glied, das stets positiv ist (§ 8).

Für das Gleichgewicht wird $k_1 k_3 A = k_2 k_4 B$, woraus sich folgende Gleichgewichtskonzentrationen berechnen:

$$\left. \begin{array}{l} A = \frac{k_2 k_4 (a + b)}{k_1 k_3 + k_2 k_4} \quad B = \frac{k_1 k_3 (a + b)}{k_1 k_3 + k_2 k_4} \\ z = \frac{r k_1 k_4 (a + b)}{(k_1 k_3 + k_2 k_4) + k_1 k_4 (a + b)} \\ R = \frac{r (k_1 k_3 + k_2 k_4)}{(k_1 k_3 + k_2 k_4) + k_1 k_4 (a + b)} \end{array} \right\} \quad (7)$$

Die Beziehungen (6) zeigen *zwei* sehr bemerkenswerte *Degenerierungen*. Wenn das r so groß ist, daß ihm gegenüber das stets sehr kleine z *verschwindend klein* ist, liegt „*Massenkatalyse*“ vor. Aus (5) berechnet sich alsdann:

$$\left. \begin{array}{l} z = \frac{r(k_1 A + k_4 B)}{k_2 + k_3} \\ R = r = \text{konst.} \\ \xi' = \frac{r(k_1 k_3 A - k_2 k_4 B)}{k_2 + k_3} \end{array} \right\} \quad (8)$$

welche Gleichungen aus den *allgemeinen* (6) für ein gegenüber $(k_2 + k_3)$ verschwindend kleines Glied $(k_1 A + k_4 B)$ hervorgehen. Bei der Massenkatalyse ist der Katalysator im wesentlichen in *freier Form* vorhanden, indem $R \approx r$ und $z \ll r$ ist.

Ist ein erheblicher Anteil der dem reagierenden Systeme zugeführten Katalysatormenge r in *gebundener Form* als Z zugegen, so liegt „*Spurenkatalyse*“ vor. Im *extremsten* Falle der letzteren ist so gut wie *aller* Katalysator als Zwischenstoff Z vorhanden, also $R \ll z$ und $z \approx r$, das Glied $(k_2 + k_3)$ ist verschwindend klein gegenüber $(k_1 A + k_4 B)$, und die allgemeinen Gleichungen (6) entarten zu:

$$\left. \begin{array}{l} z = r = \text{konst.} \\ R = \frac{r(k_2 + k_3)}{k_1 A + k_4 B} \\ \xi' = \frac{r(k_1 k_3 A - k_2 k_4 B)}{k_1 A + k_4 B} \end{array} \right\} \quad (9)$$

Die Gesetzmäßigkeit dieser Gleichungen wird um so eher in Erscheinung treten, je *größer* die Menge des *Substrates* gegenüber der des *Katalysators* ist. Damit unter diesen Bedingungen die Reaktion $A \rightleftharpoons B$ meßbar statthalt, muß der Katalysator bereits in den kleinsten Konzentrationen merklich wirksam sein, also wirkliche „*Spurenkatalyse*“ vorliegen.

Die Gleichung für ξ' in (9) ergibt für $k_4 = 0$ oder den irreversiblen Verlauf von $A \rightarrow B$ die Geschwindigkeitsgleichung $\xi' = k_3 r$, wonach die Geschwindigkeit vom Substrat *unabhängig* und allein der Konzentration des *Spurenkatalysators proportional* ist. Dieses und andere sonderbare Zeitgesetze hat W. LANGENBECK an organischen Modellen von Fermentreaktionen experimentell aufzeigen können. Es besagt, daß die Partialreaktion (1) im laufenden Gleichgewichte ist, daß letzteres ganz nach der Z -Seite verlagert und daß die Abreaktion von Z nach Reaktion (2) zeitbestimmend ist.

Selbstredend kann das Gesetz $\xi' = k_3 r$ *nicht bis Schluß* der Reaktion anhalten, weil alsdann ξ' niemals *Null* werden könnte. Für das *ganze* Reaktionsgebiet gilt allein die *allgemeine* Gleichung in (6), die für $k_4 = 0$ und das laufende Gleichgewicht von (1) zu:

$$\xi' = \frac{k_1 k_3 A r}{k_2 + k_1 A} \quad (10)$$

wird. Solange noch $k_1 A \gg k_2$, gilt $\xi = k_3 r$. In dem Maße als A *kleiner* wird, geht $\xi' = k_3 r$ unter „*Zeitgesetzwechsel*“ über (10) in:

$$\xi' = \frac{k_1 k_3 A r}{k_2}$$

über, womit für $A = 0$ auch $\xi' = 0$ wird.

Sowie der *Spurenkatalysator* dem reagierenden Systeme in *hoher* Konzentration, also „in Masse“ zugesetzt wird, wird der Zwischenstoff Z ein *Stabiles*. Alsdann muß mit den Gleichungen:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{x}_1 = k_1(a - x_1)(r - x_1 + x_2) - k_2(x_1 - x_2) \\ \dot{x}_2 = k_3(x_1 - x_2) - k_4(b + x_2)(r - x_1 + x_2) \end{array} \right\} \quad (11)$$

operiert werden. Sind x'_1 und x'_2 von ähnlicher Größenordnung, so liegt ein *Einakter* vor. Ist eine der beiden Partialgeschwindigkeiten sehr viel größer als die andere, so resultieren *Zweikater*. Die mathematische Behandlung der letzteren erfolgt auf die gleiche Weise wie in § 4.

Nach der üblichen Rechenweise wird postuliert:

$$z' = k_1 AR + k_4 BR - (k_2 + k_3)z = 0,$$

woraus sich die Gleichungen in (8) ergeben, wenn man $R = r$ setzt. Diese Lösung ist eine *Teillösung*, die allein für die *Massenkatalyse* gilt. Die *allgemeine Lösung* (6) der Rechenaufgabe kann nach der üblichen Rechenweise *nicht* erhalten werden. Letztere versagt also bei der Spurenkatalyse, und die von W. LANGENBECK beobachteten Zeitgesetze finden daher nach ihr *keine Erklärung*.

Was die übliche *Betrachtungsweise* weiters anlangt, so ist in Ansehung der letzteren unser Reaktionssystem besonders aufschlußreich. Nach der *allgemeinen Lösung* (6) ist die Konzentration des Zwischenstoffes *und* die des Katalysators im allgemeinen *variabel*, bei der Massenkatalyse ist jedoch allein das z variabel, das R aber *konstant*, im äußersten Grenzfalle der Spurenkatalyse nach (9) umgekehrt das z *konstant* und das R variabel. Die übliche Betrachtungsweise postuliert die *Konstanz* von z und gelangt auf dieser Basis zu den Gleichungen der *Massenkatalyse*, während in Wirklichkeit gerade umgekehrt die Konstanz von z nach (9) nur bei der Spurenkatalyse erfüllt sein kann.

§ 11. Die Appendixsysteme. Wir denken uns ein System, das ähnlicher Art ist wie das in § 10 behandelte, nur mit dem Unterschiede, daß *nicht* der Katalysator R selbst in das Reaktionsspiel eingreift, sondern ein *Instabiles* Y , das aus ihm entsteht:



Wenn das Y ein *Instabiles* sein soll, so muß die Reaktion (3) „umsatzlos“ im Sinne des § 2 sein. Ist auch noch Z ein *Instabiles*, wird $A \rightleftharpoons B$ *alleinige Bruttoreaktion*. Ihr *Umsatz* ξ wird durch den Verlauf von (3) *nicht* merklich beeinflußt, wohl aber ihre

Geschwindigkeit ξ . Ich habe daher vorgeschlagen, die Reaktion (3) als „Appendix“, das ganze System der Simultanreaktionen (1), (2) und (3) als „Appendixsystem“ zu bezeichnen.

Derartige Appendixsysteme sind sehr häufig. Hier gehörte die von W. LANGENBECK²⁸ untersuchte Spaltung der α -Ketocarbonsäuren in CO_2 und Aldehyd durch primäre Amine H_2NR als künstliche Carboxylasen nach dem Schema:



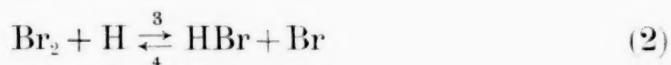
mit $A \rightleftharpoons B + C$ als Bruttoreaktion und die Reaktion (3) als umsatzloser Appendix. A ist die Ketocarbonsäure, B der Aldehyd, C Kohlendioxyd, D Wasser, R der Katalysator — das Amin —, das Instabile Y die Iminosäure, das Instabile Z das Aldehydimin.

Noch häufiger sind Appendixsysteme, bei welchen ein *Reaktant* der Bruttoreaktion *selbst* — also autokatalytisch — im Appendix ein Instabiles bildet, das in den Chemismus der Bruttoreaktion eingreift. Das ist etwa der Fall bei der vieluntersuchten reversiblen Spaltung des Phosgens²⁹ nach der Bruttoreaktion $\text{COCl}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{Cl}_2$ und dem Schema:



wo (3) der Appendix ist und Cl und COCl die Instabilen sind.

Die rechnerische Behandlung eines solchen Appendixsystems vom Standpunkt der *Theorie der Simultanreaktionen* sei an der bereits klassisch gewordenen Reaktion der *Bildung des Bromwasserstoffes* aus seinen Elementen dargelegt. Das Schema lautet:



und seine Bruttoreaktion:

²⁸ W. LANGENBECK, Z. angew. Chem. **45** (1932) 97.

²⁹ Literatur bei H. J. SCHUMACHER, Chem. Gasreaktionen (Dresden 1938) 444.



wonach also (3) der umsatzlose Appendix ist und Br und H die Instabilen sind.

Bezeichnen x_1 , x_2 und x_3 die Umsatzvariablen der Partialreaktionen, ξ die der Bruttoreaktion, so gilt:

$$\left. \begin{array}{l} [H_2] = A = a - x_1 = a - \xi \\ [Br_2] = B = b - x_2 - x_3 + b - x_2 = b - \xi \\ [HBr] = C = c + x_1 + x_2 = c + 2 \xi \\ [Br] = y = r - x_1 + x_2 + 2 x_3 \\ [H] = z = x_1 - x_2 \end{array} \right\} \quad (4)$$

Nach dem PGP ist:

$$\xi' = k_1 A y - k_2 C z = k_3 B z - k_4 C y. \quad (5)$$

Ein Umsatz nach der Bruttoreaktion hat nur dann statt, wenn sich letztere im stationären Zustande befindet. Alsdann verhält sich aber die Bruttoreaktion nach § 8 wie eine *einfache Reaktion* mit der Umsatzvariablen ξ .

Als eine *weitere* Reaktion kommt der Appendix (3) mit seiner Umsatzvariablen x_3 hinzu, so daß ein *binäres System* mit den Geschwindigkeiten ξ' und x_3' vorgelegen ist, welches System somit als *Einakter* oder *Zweiakter* zu verlaufen vermag.

Je nachdem ob ξ' oder x_3' die sehr viel größere Geschwindigkeit ist, sind *zwei Zweiakter* möglich.

A. In dem *einen Zweiakter* sei $\xi' \gg x_3'$, so daß wir während seines *ersten* Aktes x_3 vernachlässigen können und nach (4) folgt:

$$y + z = r. \quad (6)$$

Mit (5) und (6) sind *drei* Gleichungen vorgelegen, nach welchen sich ξ' , y und z berechnen lassen. Das Ergebnis der Rechnung ist: - - -

$$\left. \begin{array}{l} y = \frac{(k_2 C + k_3 B) r}{(k_2 C + k_3 B) + (k_1 A + k_4 C)} \\ z = \frac{(k_1 A + k_4 C) r}{(k_2 C + k_3 B) + (k_1 A + k_4 C)} \\ \xi' = \frac{(k_1 k_3 AB - k_2 k_4 C^2) r}{(k_2 C + k_3 B) + (k_1 A + k_4 C)} \end{array} \right\} \quad (7)$$

Die Formeln sind ganz analog den Formeln (6) in § 10. Es liegt abermals *Spurenkatalyse* vor. Die Geschwindigkeit ist von r

in hohem Maße abhängig. Dieses r ist wieder von der *Vorgeschichte* der Ausgangsstoffe abhängig, und daher sind die Messungen *schlecht* reproduzierbar. Würde man, etwa durch eine gewogene Menge Natrium³⁰, nach $\text{Na} + \text{Br}_2 = \text{NaBr} + \text{Br}$ eine *wohldefinierte* Konzentration r des Bromatoms herstellen, so wäre die Reproduzierbarkeit eine gute.

Auf den *ersten* Akt folgt dann nach einer reaktionslosen Pause der *zweite*, sehr viel *langsamere Akt*. Während desselben verläuft in „*umsatzloser*“ Reaktion der Appendix (3) mit den nach dem ersten Akt noch vorliegenden Resten an Br_2 und Br bis zum totalen Gleichgewichte.

B. Ein anderer *Zweiakter* ist für $x'_3 \neq \xi'$ zu beobachten. Im *ersten, raschen*, aber *umsatzlosen* Akte verläuft die Reaktion (3) bis zum *Gleichgewichte*, das im *langsamem zweiten Akte* ein *laufendes* ist:

$$k_6 B = k_6 y^2. \quad (8)$$

In (5) und (8) liegen nun wieder drei Gleichungen vor, nach welchen sich ξ' , y und z berechnen. Das Ergebnis der Rechnung ist:

$$\left. \begin{aligned} y &= \sqrt{\frac{k_5 B}{k_6}} \\ z &= \frac{k_1 A + k_4 C}{k_2 C + k_3 B} \sqrt{\frac{k_5 B}{k_6}} \\ \xi' &= \frac{(k_1 k_3 AB - k_2 k_4 C^2)}{k_2 C + k_3 B} \sqrt{\frac{k_5 B}{k_6}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Diese Geschwindigkeit ξ' ist natürlich *ausgezeichnet reproduzierbar*. Selbstredend sind in (7) und (9) die Konzentrationen A , B und C mit ξ nach $A = a - \xi$, $B = b - \xi$ und $C = c + 2\xi$ veränderlich, so daß stets $\xi' = f(\xi)$ ist.

C. Sind schließlich ξ' und x'_3 von *ähnlicher* Größenordnung, so liegt ein *Einakter* vor. Die Berechnung von y , z und ξ' macht alsdann eine *Integration* erforderlich, bezüglich welcher ich auf ältere Arbeiten verweise³¹. Bei der Integration machen wir nach § 6 davon Gebrauch, daß vom Zeitpunkt der Störung des stationären Zustandes bis zu seiner Wiederherstellung die *Stabilen* konstant gesetzt werden können. Während wir in § 6

³⁰ Vgl. ST. VON BOGDANDY und M. POLANYI, Z. Elektrochem. **33** (1927) 554; Naturwissensch. **15** (1927) 410.

³¹ A. SKRABAL, Mh. Chem. **64** (1934) 289; Z. Elektrochem. **42** (1936) 228.

Störungen in Zeitabständen angenommen haben, erfolgt diesmal die Störung durch den Verlauf des Appendix (3) *stetig*, was aber an der Sachlage nichts ändert. Die Integrationskonstante ergibt sich daraus, daß wir als *Nullpunkt* der Zeitzählung den Zeitpunkt der Einstellung des stationären Zustandes wählen. In diesem Zeitpunkt ist der Annahme nach noch *kein* Umsatz nach der Appendixreaktion erfolgt, so daß der zugehörige Wert von y der der Gleichungen in (7) ist.

Das *Ergebnis der Integration* lautet alsdann:

$$\left. \begin{array}{l} y = PR \\ z = \frac{\alpha}{\beta} PR \\ z' = \frac{(k_1 k_3 AB - k_2 k_4 C^2)}{\beta} PR \end{array} \right\} \quad (10)$$

worin bedeutet:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = k_1 A + k_4 C \\ \beta = k_2 C + k_3 B \\ R = \sqrt{\frac{k_5 B}{k_6}} \\ P = \frac{1 - Q \exp(-\varphi t)}{1 + Q \exp(-\varphi t)} \\ Q = \frac{(\alpha + \beta) R - \beta r}{(\alpha + \beta) R + \beta r} \\ \varphi = \frac{4 \beta \sqrt{k_5 k_6 B}}{\alpha + \beta} \end{array} \right\} \quad (11)$$

Nach dem Übergangsprinzip (§ 6) gelten obige Beziehungen nicht nur für *konstante* Konzentrationen der Stabilen, sondern auch dann, wenn letztere nach $A = a - \xi$, $B = b - \xi$ und $C = c + 2\xi$ mit ξ *variabel* sind. Unsere Gleichung für die Geschwindigkeit der Bromwasserstoffbildung ist also nicht mehr von der Form $\xi' = f(\xi)$, sondern von der Form $\xi' = f(\xi, t)$, was darauf zurückzuführen ist, daß wir eine Integration vornehmen mußten. Die Grenzwerte von ξ und t sind $\xi = 0$ für $t = 0$, und für $t = \infty$ folgt das ξ aus:

$$k_1 k_3 (a - \xi) (b - \xi) = k_2 k_4 (c + 2\xi)^2, \quad (12)$$

für welches ξ abermals alle Teilreaktionen und die Bruttoreaktion im Gleichgewichte sind.

Unsere Gleichungen in (10) und (11) sind die *allgemeine Lösung des Problems*. In ihr sind auch die *Zweiakter* und ihre Gleichungen (7) und (9) als *Grenzfälle* eingeschlossen, genau so wie im Integral des Einakers in § 7 die Gleichungen der Zweiakter in § 4 und § 5 als Grenzfälle in neueren enthalten sind. So ergeben (10) und (11) für $t=0$ und $k_5=k_6=0$ die Gleichungen (7) und für $t=\infty$ und $k_5=k_6=\infty$ die Gleichungen (9). Infolge des Vorkommens der Koeffizienten des Appendix in der e -Potenz genügt jedoch ein k_6 , das um *wenige* Zehnerpotenzen größer als k_1 ist, um den Grenzfall (9) oder das *laufende* Gleichgewicht $\text{Br}_2 \rightleftharpoons 2 \text{Br}$ herbeizuführen, was für die Beurteilung der experimentellen Ergebnisse von Bedeutung ist

Nach der *üblichen Rechenweise* wird gesetzt:

$$\left. \begin{array}{l} y' = (k_2 C + k_3 B)z + 2k_5 B - (k_1 A + k_4 C)y - 2k_6 y^2 = 0 \\ z' = (k_1 A + k_4 C)y - (k_2 C + k_3 B)z = 0 \end{array} \right\} \quad (13)$$

woraus durch Addition folgt:

$$y' + z' = 2(k_5 B - k_6 y^2) = 0. \quad (14)$$

Aus diesen Gleichungen ergeben sich *allein* die Beziehungen (9), somit *nur eine der möglichen Lösungen* der Rechenaufgabe. Die allgemeine Lösung (10) und (11), sowie der Grenzfall (7) werden nach ihnen *nicht* erhalten. Aus der Nullsetzung von $y' + z'$ nach (14) folgt $k_6 y^2 = k_5 B$ oder das *laufende* Gleichgewicht des Appendix (3). Für diesen *Spezialfall* führt die übliche Rechenweise zu dem richtigen Ergebnis.

Die Appendixsysteme decken sich mit den Systemen, die man gewöhnlich als „*Kettenreaktionen*“ bezeichnet, doch herrscht hinsichtlich der Definition des letzteren Begriffes keine Einheitlichkeit, indem sehr häufig wahllos *alle* Reaktionssysteme, die von den Klassikern als „*Folgewirkungen*“ bezeichnet wurden, unter dem Namen der Kettenreaktionen zusammengefaßt werden. Aus diesem Grunde wollen wir an der Bezeichnungsweise „Appendixsysteme“ und an der eingangs gegebenen Definition dieses Begriffes festhalten. Wie die Betrachtungsweisen, die sich an die Gleichung $z'=0$ anschließen, so bedürfen auch die Vorstellungen und Begriffe (Startreaktion oder Ketteneinleitung, Ketenträger, Kettenverzweigung, Kettenfortführung, Kettenlänge, Kettenabbruch), die mit den Kettenreaktionen verbunden sind, einer Klärung und schärferen Fassung durch die Theorie der Simultanreaktionen.

§ 12. Mediumkatalyse. Nach R. WEGSCHEIDER³² werden *zweierlei* Arten von Katalysatoren unterschieden. Die *einen* Katalysatoren ändern die *Reaktionsbahn* und damit das Reaktionsschema oder das *Reaktionssystem*. Sie werden gewöhnlich als „*Zwischenreaktionskatalysatoren*“ oder „*Übertragungskatalysatoren*“ bezeichnet. Hierher gehören die in den §§ 10 und 11

³² R. WEGSCHEIDER, Mh. Chem. 21 (1900) 361 und Z. physik. Chem. 43 (1900) 290.

behandelten Katalysen. Die *anderen* Katalysatoren ändern *nichts* an der Reaktionsbahn, wohl aber ändern sie die *durchschnittliche Beschaffenheit* aller Molekelarten und damit auch der Molekeln, die sich *nicht gerade in Reaktion* befinden. Die Beeinflussung der durchschnittlichen Beschaffenheit sämtlicher Molekeln entspricht jenen Erscheinungen, welche als „*Einfluß des Mediums*“ bekannt sind. Man kann alsdann von „*Mediumkatalyse*“ sprechen. Wenn der Mediumkatalysator bereits in solchen Konzentrationen wirksam ist, daß er das *Medium selbst nicht merklich beeinflußt*, wohl aber die *Geschwindigkeit* der in diesem Medium verlaufenden Reaktion, so liegt „*Mediumspurenkatalyse*“ vor³³.

Der Mediumspurenkatalysator *M* ändert die *Koeffizienten inverser Reaktionen* in gleicher Weise, und findet diese Änderung *proportional* seiner Konzentration statt, so lautet das Zeitgesetz, etwa der Reaktion $A \xrightleftharpoons[2]{1} B$, $x' = M(k_1 A - k_2 B)$, wo das *M* sowohl ein Reaktant als auch ein reaktionsfremder Stoff sein kann. Nach der „*Stoßtheorie*“ sagt man dann, daß die Stoffe *A* und *B* der *monomolekularen* Reaktion nur im *Zweierstoß* reagieren. Lautet die Gleichung der Reaktion $A \xrightleftharpoons[2]{1} 2B$ und demgemäß ihre Geschwindigkeit $x' = M(k_1 A - k_2 B^2)$, so ist damit gesagt, daß das *A* im *Zweierstoß*, das *B* im *Dreierstoß* reagiert. Das gilt für *verdünnte Gase*. Wenn hochgespannte Gase als Solvens oder Reaktionen in einem flüssigen Lösungsmittel vorliegen, wird das *M* im wesentlichen vom „*Medium*“ bestimmt. Bei konstantem Medium ist aber immer noch *Mediumspurenkatalyse* möglich, sowie der Katalysator *R* derart wirksam ist, daß er *nicht* die Eigenschaften des Mediums, wohl aber die *Reaktionsgeschwindigkeit* in dem gegebenen Medium bestimmt, etwa derart, daß die Geschwindigkeit inverser Reaktionen seiner Konzentration *R* proportional ist.

Mediumkatalyse ist natürlich auch bei *Bruttoreaktionen* möglich. Es ist alsdann nichts weiteres zu tun, als in den betreffenden Formeln an Stelle der Koeffizienten reziproker Reaktionen das *Produkt* aus diesen Koeffizienten mit der Katalysatorkonzentration *R* zu setzen, wo der Katalysator *R* sowohl ein reaktionsfremder Stoff, als auch ein *Stabiles*, also ein Reaktant der Bruttoreaktion, oder auch ein Massenkatalysator sein kann. Anders, wenn der Mediumkatalysator ein *Instabiles*

³³ A. SKRABAL, Homogenkinetik (Dresden 1941) 206 ff.

und damit notwendig ein *Mediumspurenkatalysator* ist, denn als dann darf seine Konzentration im Zeitgesetz der Bruttoreaktion *nicht* auftreten, wenn unsere Rechenaufgabe als gelöst bezeichnet werden soll.

Abermals sei an dem denkbar einfachsten Falle³⁴ diese *Mediumkatalyse* exemplifiziert. Die Bruttoreaktion $A \rightleftharpoons B$ soll nach:



über das Instabile Z verlaufen, so daß gilt:

$$A = a - x_1 = a - \xi \quad B = b + x_2 = b + \xi \quad z = x_1 - x_2, \quad (3)$$

und das PGP lautet:

$$\xi' = x'_1 = x'_2. \quad (4)$$

Weil die Bruttoreaktion der Annahme nach nur über Z verläuft, kann ihre Beschleunigung nur dadurch zustandekommen, daß die *Partialreaktionen* durch Z beschleunigt werden. Werden *beide* Teilreaktionen beschleunigt, so wird aus (4):

$$\xi' = z (k_1 A - k_2 z) = z (k_3 z - k_4 B), \quad (5)$$

wonach sich berechnet:

$$z = \frac{k_1 A + k_4 B}{k_2 + k_3} \quad (6)$$

und ferner:

$$\xi' = \frac{(k_1 A + k_4 B) (k_1 k_3 A - k_2 k_4 B)}{(k_2 + k_3)^2}. \quad (7)$$

Die Reaktion wird daher „bruttomäßig“ sowohl durch das Edukt A als auch durch das Produkt B katalytisch beschleunigt. Auf daß sie „anläuft“, bedarf es nach (5) des Zwischenstoffes Z , da aber grundsätzlich kein Stoff absolut frei von seinen Zersetzungspunkten ist, ist die Möglichkeit des Anlaufens stets gegeben. Die Anlaufzeit fällt überdies in die *vor* der Stationaritätsperiode gelegene, umsatzlose Einleitungsperiode. Einmal im stationären Zustande, ist die Reaktion nach dem Zeitgesetze (7) *streng reproduzierbar*.

Reaktionen, deren Ablauf eine kürzer oder länger währende, aber häufig schwer reproduzierbare *Keimungsperiode* vorausgeht, die aber, einmal im Gange, streng reproduzierbar verlaufen, gibt es in großer Zahl. Ich erinnere an die

³⁴ Vgl. hiezu auch D. A. FRANK-KAMENETZKI, J. physik. Chem. **14** (1940) 695 (russisch).

Einwirkung von Permanganat auf Oxalsäure mit *kurzer*, und an die ähnliche Einwirkung von Salpetersäure auf Alkohol mit oft *tagelanger* Keimungszeit. Sie werden durch einen *Zwischenstoff* beschleunigt, der grundsätzlich sowohl Übertragungskatalysator als auch Mediumkatalysator sein kann³⁵.

Die weitere Möglichkeit ist die, daß *nur eine* der Teilreaktionen durch *Z* beschleunigt wird. Wir greifen von den beiden denkbaren Fällen nur den interessanteren heraus, den der Beschleunigung der *ersten* Partialreaktion. Die Beziehung (4) lautet dann:

$$\xi' = z (k_1 A - k_2 z) = k_3 z - k_4 B. \quad (8)$$

Das gibt die in *z* *quadratische* Gleichung:

$$k_2 z^2 + (k_3 - k_1 A) z - k_4 B = 0, \quad (9)$$

von deren beiden reellen Wurzeln nur eine *positiv* ist und daher allein einen physikalischen Sinn hat. Setzen wir zur Abkürzung:

$$W = \sqrt{(k_3 - k_1 A)^2 + 4 k_2 k_4 B}, \quad (10)$$

so lautet letztere:

$$z = \frac{W - (k_3 - k_1 A)}{2 k_2}, \quad (11)$$

oder damit identisch:

$$z = \frac{2 k_4 B}{W + (k_3 - k_1 A)}. \quad (12)$$

Von den beiden Ausdrücken ist für den Zweck der Diskussion und der numerischen Rechnung bald der eine, bald der andere geeigneter.

Analog berechnen sich für die Bruttogeschwindigkeit die zwei Ausdrücke der Form:

$$\xi' = \frac{k_3 W - [k_3(k_3 - k_1 A) + 2 k_2 k_4 B]}{2 k_2} \quad (13)$$

$$\xi' = \frac{2 k_4 B (k_1 k_3 A - k_2 k_4 B)}{k_3 W + [k_3(k_3 - k_1 A) + 2 k_2 k_4 B]}. \quad (14)$$

Die Gleichung (14) enthält die Richtungsdifferenz der Bruttoreaktion und besagt, daß für $k_2 k_4 B = k_1 k_3 A$ das Gleichgewicht erreicht ist, und ferner, daß die Reaktion bruttomäßig durch das *Reaktionsprodukt B*, also *autokatalytisch* beschleunigt wird.

Nur durch das Ausrechnen von *Zahlenbeispielen* gewinnt man einen Einblick in den Ablauf des chemischen Geschehens. Wir wollen daher das *z* und die Geschwindigkeit ξ' nach obigen

³⁵ Siehe auch W. LANGENBECK, Naturwiss. 30 (1942) 30.

Formeln für gegebene Werte der *Koeffizienten* und der Konzentrationen *A* und *B* berechnen, wo die Konzentrationen der Stabilen nach (3) durch $A+B=a+b$ geregelt sind.

Die Reaktion $A \rightleftharpoons B$ der Tabelle 5 ist merklich *reversibel*. Die Konstanten sind: $k_1 = 2 \cdot 10^{-2}$, $k_2 = 2 \cdot 10^4$, $k_3 = 10^{-2}$, $k_4 = 1/9 \cdot 10^{-8}$, ferner $a = 1$ und $b = 0$.

Tabelle 5.

<i>A</i>	<i>B</i>	$10^2 (k_3 - k_1 A)$	$10^2 W$	$10^2 z$	$10^9 \xi'$
0.99	0.01	- 0.98	0.98452	4.911	4.90
0.90	0.10	- 0.80	0.85374	4.134	4.02
0.70	0.30	- 0.40	0.65320	2.633	2.30
0.50	0.50	± 0	0.66666	1.666	1.111
0.30	0.70	+ 0.40	0.88442	1.211	0.433
0.15	0.85	+ 0.70	1.1160	1.040	0.096
0.11	0.89	+ 0.78	1.1831	1.008	0.019
0.10	0.90	+ 0.80	1.2000	1.000	0

Der Reaktionsverlauf ist ein ganz *normaler*. Anders, wenn die Reaktion $A \rightleftharpoons B$ *irreversibel* im Sinne des § 2 ist, was für ein sehr kleines k_4 zutrifft. Alsdann sind, je nachdem ob $k_1 a$ kleiner oder größer als k_3 ist, *zwei Fälle* zu unterscheiden. In der Tabelle 6 sind die beiden Fälle mit $a = 1$ und $b = 0$ für folgende Koeffizienten ausgerechnet:

	k_1	k_2	k_3	k_4	
Fall A:	10^{-2}	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^{-2}$	10^{-16}	$k_1 a < k_3$
Fall B:	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^4$	10^{-2}	10^{-16}	$k_1 a > k_3$

Tabelle 6.

		Fall A		Fall B	
<i>A</i>	<i>B</i>	$10^{14} z$	$10^{16} \xi'$	z	ξ'
0.99	0.01	0.0099	0.0098	$4.9 \cdot 10^{-7}$	$4.9 \cdot 10^{-9}$
0.90	0.10	0.0909	0.0818	$4.0 \cdot 10^{-7}$	$4.0 \cdot 10^{-9}$
0.70	0.30	0.2308	0.1616	$2.0 \cdot 10^{-7}$	$2.0 \cdot 10^{-9}$
0.50	0.50	0.3334	0.1667	$5.0 \cdot 10^{-11}$	$5.0 \cdot 10^{-13}$
0.30	0.70	0.4119	0.1236	$1.75 \cdot 10^{-14}$	$1.05 \cdot 10^{-16}$
0.10	0.90	0.4735	0.0473	$1.12 \cdot 10^{-14}$	$0.22 \cdot 10^{-16}$
0.01	0.99	0.4973	0.0050	$1.01 \cdot 10^{-14}$	$0.02 \cdot 10^{-16}$
10^{-8}	1	0.5	0	10^{-14}	0

Im Falle *A* ist die Differenz $\Delta = k_3 - k_1 A$ von Anfang an *positiv* und *bleibt* es, da das *A* mit der Zeit immer nur kleiner wird. Das zweite Glied unter der Wurzel *W* ist verschwindend klein, so daß durch Reihenentwicklung folgt:

$$z = \frac{k_4 B}{k_3 - k_1 A}, \quad (15)$$

gemäß der Gleichung (12) für $W = k_3 - k_1 A$. Das *z* steigt *dauernd* an, und dementsprechend verhält sich die Bruttogeschwindigkeit ξ' : Sie nimmt anfangs zu, erreicht ein Maximum und klingt wieder ab. Die Bruttoreaktion verhält sich ganz normal wie jede andere *autokatalytische* Reaktion. Das Gleichgewicht wird in einem *Einakter* erreicht.

Der Verlauf im Falle *B* ist *ungewöhnlich*. Zu Anfang ist $\Delta < 0$ und das zweite Glied der Wurzel zunächst noch verschwindend klein. Nach (10) und (11) folgt alsdann:

$$z = \frac{k_1 A - k_3}{k_2}, \quad (16)$$

doch hält diese Beziehung *nicht* an, weil *A* rasch kleiner wird, und in dem *Augenblicke*, da $k_1 A = k_3$ geworden, folgt für *diesen Zeitpunkt* nach (9):

$$z = \sqrt{\frac{k_4 B}{k_2}}, \quad (17)$$

und von da ab ist Δ wieder *positiv*. Alsbald wird wieder Δ^2 groß gegenüber $4k_2 k_4 B$, so daß nunmehr die Beziehung (15) gilt. Der katalysierende Zwischenstoff *fällt ständig*, zunächst *allmählich*, in unmittelbarer Nähe des Zeitpunktes, da gerade $k_1 A = k_3$ geworden, aber *rapid*, im durchgerechneten Beispiele um 7 Zehnerpotenzen, später wieder *allmählich*, und demgemäß verhält sich auch die Geschwindigkeit ξ' .

Der Fall *B* verhält sich wie ein *Zweiakter*, dessen Akte *pausenlos* ineinander übergehen. Ist $\xi' = 10^{-16}$ eine *meßbare* Geschwindigkeit, so ist der Einakter *A* *meßbar*, der erste Akt des Zweiakters *B* *unmeßbar rasch* und erst der *zweite* Akt *meßbar*. Das Merkwürdige an dem Zweiakter ist, daß in beiden Akten *derselbe* Bruttovorgang $A \rightarrow B$, aber mit sehr verschiedener Geschwindigkeit verläuft.

Die Gleichungen (11) bis (14) sind die *allgemeinen* des *Einakters*, in denen als *Entartungen* auch die des *Zweiakters* enthalten sind, ähnlich wie in den Gleichungen des Einakters in § 7 auch die Gleichungen der Zweiakter in §§ 4 und 5 als Degene-

rierungserscheinungen eingeschlossen sind. Auch im vorliegenden Falle sind die Gleichungen (15), (16) und (17) die Wurzeln der *linearen* und *quadratischen* Gleichungen:

$$\left. \begin{array}{l} (k_3 - k_1 A)z - k_4 B = 0 \\ k_2 z + (k_3 - k_1 A) = 0 \\ k_2 z^2 - k_4 B = 0 \end{array} \right\}, \quad (18)$$

die Entartungen der *allgemeinen* quadratischen Gleichung (9) für ein *verschwindend kleines* $k_4 B$ vorstellen. Die *erste* Gleichung in (18) liefert das *kleine* z des *zweiten* Aktes, die *zweite* das *große* z des *ersten* Aktes des *Zweiakters* und die *dritte* Gleichung die singuläre Wurzel für $k_1 A = k_3$:

Bei den Berechnungen von zusammengesetzten Reaktionen ist es sehr häufig *üblich*, Degenerierungen bereits in dem *ursprünglichen* Ansatz vorzunehmen. Alsdann würden wir für ein sehr kleines k_4 an Stelle von (8) erhalten:

$$\xi' = z(k_1 A - k_2 z) = k_3 z \quad (19)$$

beziehungsweise — nach der *BODENSTEINSCHEN* Rechenmethode —:

$$z' = k_1 A z - (k_2 z^2 + k_3 z) = 0 \quad (20)$$

und hieraus als *einige Lösung* der Rechenaufgabe:

$$z = \frac{k_1 A - k_3}{k_2} \quad (21)$$

und damit für die *Geschwindigkeit* der irreversiblen Reaktion $A \rightarrow B$:

$$\xi' = \frac{k_3 (k_1 A - k_3)}{k_2} \quad (22)$$

Das würde besagen, daß die Reaktion $A \rightarrow B$, entgegen der Annahme des *rollständigen* Ablaufes, nur dann verläuft, wenn $k_1 A > k_3$, und *stehen bleibt*, wenn $k_1 A = k_3$ geworden ist. Dieses Rechenergebnis ist ein „*kinetisches Paradoxon*“, ähnlich dem „*thermodynamischen Paradoxon*“ von R. WEGSCHEIDER³⁶. In der Tat bleibt die Reaktion *nicht* stehen, sondern verläuft in einem *zweiten* Reaktionsakte mit sehr *verminderter* Geschwindigkeit weiter.

Bei Simultanreaktionen ist es also im allgemeinen *nicht* statthaft, mit irreversiblen Abläufen von *vorher* zu operieren. So habe ich vor kurzem gezeigt³⁷ daß die *Nebenreaktionen* $A \rightleftharpoons B_1$ und $A \rightleftharpoons B_2$ *notwendig* auch zu dem Gleichgewichte $B_1 \rightleftharpoons B_2$ führen müssen, was aber nur dann möglich ist, wenn sie grundsätzlich *reversibel* sind. Ist die Reversibilität eine merkliche, so wird das totale Gleichgewicht in einem *Einakter* erreicht, sind jedoch die beiden Nebenwirkungen „*irreversibel*“ im Sinne des § 2, so wird das totale Gleichgewicht erst im zweiten Akte eines *Zweiakters* erzielt. Die Dinge liegen also genau so, wie in dem soeben behandelten Falle *B* der Mediumkatalyse.

³⁶ R. WEGSCHEIDER, Mh. Chem. **22** (1901) 849 und Z. physik. Chem. **39** (1902) 266.

³⁷ A. SKRABAL, Ber. dtsch. chem. Ges. **76** (1943) 281.

Die *zusammengesetzten Reaktionen* sind ebenfalls Simultanreaktionen, die grundsätzlich reversibel sind. Das Zeitgesetz der *irreversiblen* Bruttoreaktion erhält man aus dem der *reversiblen* durch Vernachlässigung des *zweiten* Gliedes der Richtungsdifferenz. Es ist aber bedenklich, zur Vereintachung bereits im Schema *irreversible Teilreaktionen* anzunehmen — was sehr häufig geschieht — weil diese Rechnung zu *unrichtigen* Ergebnissen führen kann, was namentlich dann zutrifft, wenn durch diese vereinfachende Annahme der *Grad* der Gleichungen in den Instabilen ein *anderer* (niederer) wird.

Zusammenfassung und Schlußwort.

Die Mehrzahl der im Experimente zu beobachtenden chemischen Umsetzungen sind nach allen Erfahrungen keine Direktreaktionen, sondern aus einfachen Teilreaktionen zusammengesetzt oder *Bruttoreaktionen*. Sie wurden im Jahre 1913 von M. BODENSTEIN durch die *postulierte Annahme* einer zeitlichen Unveränderlichkeit der *Instabilen* der experimentellen Erforschung zugänglich gemacht, und von da ab hat eine ungeahnte Entwicklung der chemischen Kinetik ihren Anfang genommen. Sein *Postulat* hat BODENSTEIN nicht auf mathematischem Wege durch Herleitung, sondern auf intuitivem Wege gewonnen. Es ist der klassischen chemischen Kinetik *fremd*, und daher sieht BODENSTEIN auch noch 1942 in seinem Rechenverfahren einen Fortschritt gegenüber der klassischen Kinetik von VAN'T HOFF.

In vorliegender Untersuchung wurde dasselbe Problem vom Standpunkt der aus der klassischen chemischen Kinetik fließenden allgemeinen *Theorie der Simultanreaktionen* behandelt. Nach letzterer weist ein aus n unabhängigen Reaktionen bestehendes System von Simultanreaktionen neben der *Zeit* als der *einen* Veränderlichen n *Umsatzvariable* oder Stoffvariable und daher n unabhängige Reaktionsgeschwindigkeiten auf. Ein derartiges System vermag im allgemeinen als Einakter, Zweiakter bis n -Akter zu verlaufen. Mit Ablauf des *letzten* Aktes ist das totale chemische Gleichgewicht erreicht. Zwischen den einzelnen Reaktionsakten liegen kürzere oder längere reaktionslose Pausen. Die Reaktionsdauer der zeitlich aufeinander folgenden Akte ist größtenteils verschieden, derart, daß jeder Reaktionsakt zu seinem Ablauf ungleich viel mehr Zeit beansprucht als der vorhergehende Akt. Ein weiteres Kennzeichen des Mehrakters ist folgendes: Jede *Beziehung* zwischen den Reaktanten des Systems, die mit Ende eines Reaktionsaktes gerade erreicht und also in der unmittelbar darauffolgenden reaktionslosen Pause „*stehend*“ ist, wird in allen folgenden Reaktionsakten zu einer „*laufenden*

Beziehung. In den stehenden Beziehungen sind die Konzentrationen der Reaktanten konstant, in den laufenden mit der Zeit veränderlich.

Systeme mit Instabilen, die zu einer und nur zu *einer Bruttoreaktion* führen, sind stets dadurch charakterisiert, daß sie nur *einen einzigen Reaktionsakt* mit einem *erheblichen Stoffumsatz* aufweisen. Diesem Reaktionsakte gehen umsatzlose Reaktionsakte voraus und umsatzlose Reaktionsakte können ihm folgen. Die in den vorhergehenden Akten ausgebildeten und in dem *Umsatzakte* laufenden Beziehungen entsprechen dem sogenannten *stationären Zustande*. In letzterem sind die Geschwindigkeiten der Teilreaktionen untereinander gleich und gleich der Geschwindigkeit der Bruttoreaktion (*Prinzip der Gleichheit der Partialgeschwindigkeiten*). Hieraus folgt, daß im stationären Zustande die zeitliche Veränderlichkeit der Stabilen eine *große*, die der Instabilen eine *kleine Differenz zweier Terme* ist. Erst im Gleichgewichte werden alle diese Differenzen Null.

Nach der BODENSTEINSchen Rechenweise wird *de facto* gar nicht von der *Konstanz* der Instabilen, sondern allein davon Gebrauch gemacht, daß die zeitliche Veränderlichkeit der letzteren als kleine Differenz zweier Terme so beschaffen ist, daß die Terme einander gleichgesetzt werden können. Der *Beweis* hiefür wurde aber *nicht* von BODENSTEIN, sondern erst 1934 vom Verfasser erbracht. Von der BODENSTEINSchen Schule konnte dieser Nachweis darum nicht geführt werden, weil sie nur mit Konzentrationen und nicht mit Umsatzvariablen operiert. Die Aufteilung der Konzentrationen der Reaktanten in die konstanten Anfangskonzentrationen und die Stoffvariablen der unabhängigen Reaktionen ist jedoch die unerlässliche Voraussetzung für die mathematische Behandlung der Rechenaufgabe.

Die Rechenmethode von BODENSTEIN führt in vielen Fällen zur *richtigen Lösung*, in anderen aber nur zu einer *möglichen Lösung* der Rechenaufgabe. Wie gezeigt wurde, trifft letzteres dann zu, wenn „*Spurenkatalyse*“ vorliegt. Allein die Theorie der Simultanreaktionen führt zur *allgemeinen Lösung* des Rechenproblems.

Es ist richtig, daß die BODENSTEINSche Rechenweise zwar einen Fortschritt gegenüber der *klassischen Kinetik* von 1913, nicht aber gegenüber der *Gegenwart* bedeutet, denn die lediglich auf der klassischen Kinetik von VAN'T HOFF, OSTWALD und ARRHENIUS und dem kinetischen Massenwirkungsgesetze von

GULDBERG und WAAGE fußende Theorie der Simultanreaktionen vermag nicht nur die zusammengesetzten Reaktionen, sondern *jedes beliebige* System von Simultanreaktionen zu meistern und der rechnerischen Lösung zuzuführen. Zugleich bildet die Theorie der Simultanreaktionen den gesicherten *Rahmen* für den weiteren Ausbau der chemischen Kinetik, sei es im Sinne der kinetischen Theorie der Materie, der neueren Quantentheorie oder etwaiger künftiger Theorien der Physik und Chemie.

Seit dem Jahre 1927 habe ich mich mit der Deutung, Klärung und Umbildung der BODENSTEINSchen Rechenmethode auf Grundlage der klassischen chemischen Kinetik befaßt und war wiederholt auch bemüht — namentlich während der letzten Jahre — mit BODENSTEIN ein Einvernehmen zu erzielen. Der unerwartete und beklagenswerte Tod dieses um die chemische Kinetik verdienten Altmeisters und ausgezeichneten Experimentators hat auch diesen Bemühungen ein vorzeitiges Ende bereitet. Ich kann daher meine Darlegungen leider nur mehr an die Adresse seiner zahlreichen Schüler und Anhänger in aller Herren Länder richten und will sie mit dem Hinweis auf einen Ausspruch von M. PLANCK³⁸ schließen, der, wie mir scheint, auch auf den BODENSTEINSchen *Gedankengang* und seine durch mich erfolgte *Umbildung* paßt: „Im Gegensatz zu den bisher genannten Ideen, welche unmittelbar in vollendet Form auftauchten und für immer unverändert in Geltung bleiben werden, weisen die meisten in die Wissenschaft eingetretenen Ideen eine wechselvolle Geschichte auf; sie nehmen oft erst allmählich eine bestimmte Form an, befruchten dann eine Zeitlang die Forschung und sterben dann schließlich wieder ab oder werden mehr oder weniger stark umgebildet. Dabei passiert es häufig, daß sie einer Umbildung zunächst einen gewissen Widerstand entgegensetzen, und zwar um so hartnäckiger, je mehr Erfolg sie vorher gezeigt hatten, wodurch unter Umständen der Fortschritt der Wissenschaft sogar merklich gehemmt werden kann“. Inwieweit dies auch im *gegebenen Falle* zutrifft, wird in letzter Linie die Zukunft und die Lehrmeisterin Geschichte erweisen.

³⁸ M. PLANCK, Wege zur physikalischen Erkenntnis (Leipzig 1933) 263.

Studien zum Raman-Effekt

Mitteilung 147: Benzolderivate XXII: Abkömmlinge der Salicylsäure

Von

L. KAHOVEC und K. W. F. KOHLRAUSCH

o. M. d. Akad. d. Wiss.

253. Mitteilung aus dem Physikalischen Institut der Techn. Hochschule Graz

Mit 2 Figuren im Text

(Eingegangen am 23. 6. 1943. Vorgelegt in der Sitzung am 24. 6. 1943)

Den Anstoß zur näheren Beschäftigung mit den Salicylsäure-Abkömmlingen gab vor zwei Jahren Herr Professor Dr. L. ANSCHÜTZ (Brünn) durch die Anregung, die beiden von ihm hergestellten Disalicylide zu spektroskopieren und daraus, wenn möglich, eine Aussage über deren Struktur abzuleiten. Die Untersuchung wurde durchgeführt und unsere vorläufige Stellungnahme zu diesem Strukturproblem in der einschlägigen Veröffentlichung von ANSCHÜTZ-NEHER¹ angeführt. Doch stellte es sich damals als wünschenswert heraus, das zum Vergleich und zum Analogieschluß zu verwendende Erfahrungsmaterial durch Neuaufnahmen an Stoffen mit voraussichtlich verwandter aber vorgegebener Struktur zu erweitern.

Die äußeren Verhältnisse bewirkten eine starke Verzögerung in der Durchführung dieses Vorhabens; inzwischen hat sich, wie wir einer Privatmitteilung von Herrn Prof. Dr. ANSCHÜTZ entnehmen, die Lage insoferne geändert, als noch weiteres Erfahrungsmaterial zur Beantwortung der Strukturfrage gesammelt wurde. Während das chemische Verhalten der beiden Disalicylide sich sehr wohl mit der Annahme von Stereoisomerie vereinbaren läßt, erscheinen die Ergebnisse der physikalischen Versuche widerspruchsvoll. Leider ist die Sicherheit der aus den Schwingungsspektren so vielatomiger Moleküle zu gewinnenden Aussagen zu gering, als daß von ihnen eine Entscheidung erwartet werden könnte.

Es sind nun die Spektren der folgenden Salicylsäure-Derivate bekannt: Der Säure selbst², ihres Methylesters³, Äthylesters⁴, Säurechlorids⁵ und von Salicylaldoxim⁶; dazu kommen die im

¹ L. ANSCHÜTZ u. R. NEHER, J. prakt. Chem. 2 **159** (1941) 264; vgl. auch die 2. Mitteilung von L. ANSCHÜTZ u. A. MAYER, ebenda **2** **159** (1942) 343.

² E. HERZ u. H. WITTEK, Mitteilung **144**, Mh. Chem. **74** (1943) 271.

³ L. KAHOVEC u. J. WAGNER, Mitteilung **145**, Mh. Chem. **74** (1943) 279.

⁴ K. W. F. KOHLRAUSCH u. W. STOCKMAIR, Mh. Chem. **66** (1935) 316.

⁵ L. KAHOVEC u. K. W. F. KOHLRAUSCH, Z. physik. Chem. (B) **38** (1937) 119.

⁶ L. KAHOVEC u. K. W. F. KOHLRAUSCH, Ber. dtsch. chem. Ges. **75** (1942) 1541.

Anhang zusammengestellten Messungsergebnisse an salicylsaurem *n*-Propyl-, *i*-Propyl-, *n*-Butyl-, Phenyl-Ester, an α - und β -Disalicylid (ANSCHÜTZ), Salicoyl-salicylsäure (Diposal), Acetyl-salicylsäure (Aspirin) und deren Chlorid sowie an K-, Ca-, Mg-, Zn-Salicylat.

Diskussion der Ergebnisse.

A) Salicylsäure, Ester, Salze.

In Fig. 1 sind zunächst zur Vermittlung des für jede Diskussion unentbehrlichen Überblickes die Spektren der Salicylsäure und ihrer verhältnismäßig einfach gebauten Derivate, wie

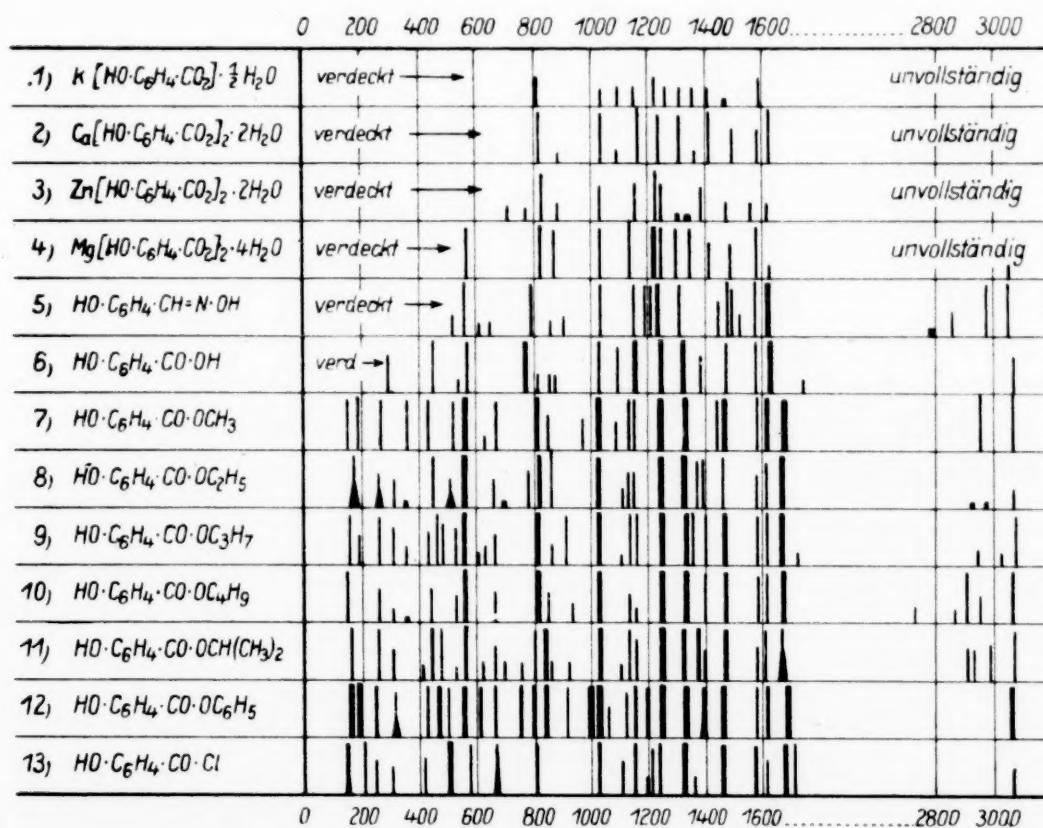


Fig. 1. Nr. 1-4 salicylsaure Salze, Nr. 5 Salicylaldoxim, Nr. 6 Salicylsäure, Nr. 1-6 Kristallpulveraufnahmen, Nr. 7-11 Alkylester, Nr. 12 Phenylester (Salol), Nr. 13 Salicoylchlorid. Nr. 7-13 Flüssigkeitsaufnahmen.

etwa die Salze und Ester, eingetragen. Es handelt sich fast durchweg um sehr gut streuende Substanzen, die sogar unter den weniger günstigen Aufnahmsbedingungen für das Kristallpulver noch das liefern, was wir ein „Balkenspektrum“ zu nennen pflegen: Eine Anzahl der Normalschwingungen ist so stark Raman-aktiv, daß man die Überexposition der zugehörigen Linien in Kauf nehmen muß, wenn man auch die restlichen schwachen

Linien auf die Platte bekommen will. Diese überstarken und dazu meist lagenkonstanten Linien geben der Figur 1 das für sie charakteristische Gepräge.

Um zu einem Verständnis dieser Viellinienspektren zu gelangen, sei zunächst auf die Figuren 3 der Mitteilungen 144² und 145³ verwiesen, in denen der Versuch gemacht wurde, die Spektren der in ortho-Stellung kernsubstituierten Benzoesäure $X \cdot C_6H_4 \cdot CO \cdot OH$ und ihres Methylesters $X \cdot C_6H_4 \cdot CO \cdot OCH_3$ durch Ausführung des spektralen Überganges in $X = NH_2, OH, OCH_3, CH_3, Cl, Br, J$ bis $X = H$ zu analysieren. Das dort erzielte Ergebnis gestattet es, über die Mehrzahl der charakteristischen, in Tab. 1 zahlenmäßig zusammengestellten Linien die folgenden einigermaßen gesicherten Aussagen zu machen:

1. Die Linien Nr. 6, 8, 12, 14, 15 der Tab. 1 gehören fast sicher, Linie Nr. 7 wahrscheinlich, Linie Nr. 13 vielleicht zu den ebenen Kettenschwingungen $\omega_2, \omega_4, \omega_3, \omega_7, \omega_8$ bzw. ω_1 bzw. ω_6 des Benzolkernes. Dazu ist zu bemerken, daß somit die Linie 12 von uns als Kettenschwingung gedeutet wird, während sie von BONINO-MANZONI⁷ als eine für die Bildung des inneren Chelatringes charakteristische Schwingung angesehen wird; wir sind diesbzgl. anderer Meinung, da sich sonst der spektrale Übergang in Figur 3 von Mitteilung 145³ nicht durchführen ließe. Auch der meta- und para-substituierte Oxybenzoesäure-Ester weist Frequenzen in diesem Gebiet auf, die ω_3 zugeordnet werden müssen. — Bei der Zuordnung von Linie 7 zu ω_1 und Linie 13 zu ω_6 sind es vorwiegend die Intensitätsverhältnisse, die uns unsicher machen. Insbesondere ist nicht zu verstehen, warum die sonst meist wenig intensive Frequenz ω_6 hier so abnorm stark auftritt. Andererseits kann diese Linie mindestens in den Molekülen Nr. 6, 12, 13 der Figur 1 oder in den Salzen Nr. 1 bis 4 keinesfalls als CH-Deformationsfrequenz der aliphatischen Esterkette erklärt werden.

2. Die Linien Nr. 10 und 11 sind als CH-Deformationsschwingungen $\delta_{3,4}$ und δ_2 der aromatischen Methingruppen anzusehen, wobei man vielleicht etwas im Zweifel sein könnte, ob nicht $\delta_{3,4}$ aufgespalten und auch für Linie 9 verantwortlich zu machen ist; doch ist dies, beurteilt nach Fig. 3 in Mitteilung 145, nicht wahrscheinlich.

⁷ G. B. BONINO u. R. MANZONI-ANSIDEI, La Ric. Scient. VIII/2 (1937) Nr. 5/9; Rend. Accad. Lincei 28 (1939) 259.

3. Die Linien Nr. 1, 2, 4, 5, 9, 16 verdanken ihren Ursprung dem Vorhandensein der Substituenten OH und CO-OR; Linie 1 und 2 kann mit einiger Sicherheit der Oxygruppe, Linie 9 und 16 der Carboxalkylgruppe zugeordnet werden.

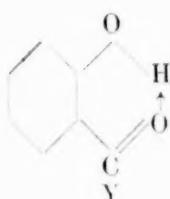
4. Die CO-Frequenzen der Substanzen ortho-X-C₆H₄-CO-Y erleiden bekanntlich (vgl. z. B. KAHOVEC-KOHLRAUSCH⁵) im allgemeinen eine merkliche Erniedrigung $\Delta\omega$ dann, wenn X=OH

Tabelle 1. *Lagenkonstante Linien in Salicylsäure und Estern HO-C₆H₄-CO-OR.*

R	1 $\Gamma(\text{OH})$	2 $\Delta(\text{OH})$	3	4 OH	5 CO-OR	6 ω_2	7 ω_1	8 ω_4
H	verdeckt	288 (3)	—	453 (5)	570 (7)	?	810 (1)	1031 (8)
CH ₃	147 (8)	263 (7)	—	437 (7)	562 (14)	664 (4)	807 (17)	1032 (12)
C ₂ H ₅	171 (8b)	254 (3b)	308 (2)	447 (5)	560 (10)	662 (2)	815 (8)	1028 (8)
C ₃ H ₇ n	154 (6b)	260 (4)	308 (3)	433 (3)	561 (10)	662 (2)	809 (10)	1030 (9)
C ₄ H ₉ n	152 (5)	254 (3)	307 (1/2)	445 (3)	562 (7)	663 (2)	816 (7)	1030 (9)
C ₃ H ₇ i	163 (7)	257 (5)	301 (2)	444 (5)	564 (9)	663 (2)	800 (6)	1031 (8)
C ₆ H ₅	159 (12)	246 (8)	315 (4b)	435 (5)	558 (10)	665 (7)	795 (7)	1030 (12)
R	9 CO-OR	10 $\tilde{\omega}_{3,4}$	11 $\tilde{\omega}_2$	12 ω_3	13 ω_6	14 ω_7	15 ω_8	16 $\omega(\text{C}:O)$
H	—	1154 (9)	1247 (14)	1324 (12)	1474 (9)	1581 (8)		1633 (12)
CH ₃	1134 (8)	1154 (6)	1250 (12)	1332 (12)	1466 (12)	1583 (8)	1614 (10)	1677 (10)
C ₂ H ₅	1132 (3)	1150 (3)	1244 (12)	1324 (11)	1460 (8)	1582 (3)	1612 (4)	1670 (10)
C ₃ H ₇ n	1137 (5)	1156 (5)	1247 (12)	1327 (9)	1467 (10)	1583 (5)	1614 (7)	1672 (10)
C ₄ H ₉ n	1141 (2)	1159 (1/2)	1248 (11)	1327 (10)	1467 (8)	1583 (4)	1614 (5)	1672 (9)
C ₃ H ₇ i	1141 (5)	1159 (4)	1250 (9)	1322 (8)	1469 (8)	1585 (3)	1609 (5)	1670 (8)
C ₆ H ₅	1127 (4)	1157 (9)	1246 (13)	1332 (14)	1464 (12)	1581 (9)	1614 (8)	1687 (14)

oder NH₂ ist. Für die ortho-Oxy-Derivate sind Beispiele in Tab. 2 zusammengestellt. Die 2. Spalte gibt die CO-Frequenzen der Stammkörper C₆H₅-CO-Y, während in der 3., 4. und 5. Spalte die CO-Frequenzen nach ortho-Substitution mit Methyl, Oxy, Methoxy enthalten sind. $\Delta\omega$ in der 6. Spalte ist die Frequenzerniedrigung beim Übergang vom Stammkörper zum ortho-Oxy-Derivat. Abgesehen von der nicht ganz geklärten CO-Verdopplung im Oxybenzaldehyd — in Tabelle 2 ist das Mittel aus 1642 (4) und 1662 (6) eingetragen — und von dem ebenfalls unaufgeklärten Auftreten von Trabanten (geklammerte Frequenzen) in den

Methoxyderivaten, erkennt man aus Tabelle 2, daß die Frequenzerniedrigung in den Oxykörpern verschwindet, wenn das H-Atom der Oxygruppe durch Substitution mit Methyl und Übergang zu den Methoxykörpern entfernt wird. Es ist also die H-Brücke, die die Frequenzerniedrigung bewirkt, und zwar durch Bildung eines „inneren Chelats“.



Daß es sich um innermolekulare und nicht um zwischenmolekulare H-Brücken handelt, wurde u. a. von ROLLA⁸ daran gezeigt, daß die CO-Frequenzen des o-Oxybenzaldehyds in Lösung unverändert bleiben.

Die Ausnahmestellung der Salicylsäure, für die $\Delta\omega = 0$ ist, kommt offenbar dadurch zustande, daß der $\omega(\text{CO})$ -Wert der Benzoesäure durch Dimerisierung über zwischenmolekulare

Tabelle 2. CO-Frequenzen in *ortho*-X-C₆H₄-CO-Y.

	X = H	X = CH ₃	X = OH	X = OCH ₃	$\Delta\omega$
X-C ₆ H ₄ -CO-OH	1633	1633	1633	1635	0
X-C ₆ H ₄ -CO-H	1697	1688	1652 ⁹	(1661) 1684	45
X-C ₆ H ₄ -CO-OC ₂ H ₅	1715	1715	1672	(1697) 1722	43
X-C ₆ H ₄ -CO-OCH ₃	1719	1716	1677	(1699) 1719	42
X-C ₆ H ₄ -CO-OC ₆ H ₅	1740	n. b.	1687	n. b.	53
X-C ₆ H ₄ -CO-Cl	1727 (7) 1772 (11)	1725 1770	1712 (6) 1681 (10)	1724 1776	91

n. b. . . nicht bearbeitet; $\Delta\omega = \omega(\text{X} = \text{H}) - \omega(\text{X} = \text{OH})$

O-H . . . O-Brücken ebenso erniedrigt ist, wie dies in der Salicylsäure durch innermolekulare O-H . . . O-Brücken erfolgt. Die Ausnahmestellung der Säurechloride läßt sich nach unserem seinerzeitigen Vorschlag⁵ dadurch erklären, daß man im Benzoesäurechlorid $\omega(\text{CO}) = 1727$ zu assoziierten Molekülen (zwischenmolekulare C-H . . . O-Brücken) gehörig ansieht, die durch die Oxysubstitution nicht wesentlich beeinflußt werden, während die

⁸ M. ROLLA, Rend. Roma 1 (1940) 756.

nicht assoziierten Moleküle dabei innermolekulare O-H...O-Brücken bilden und die CO-Frequenz der konstitutiv bekanntlich sehr empfindlichen CO-Cl-Gruppe von 1772 auf 1681 erniedrigen. Dieser Auffassung entsprechen auch die in Tab. 2 eingetragenen Intensitätsverhältnisse.

5. Wie in anderen Phenylestern⁹ ist auch in Salol die CO-Frequenz erhöht gegenüber den für die Alkylester gültigen Werten. Es sind für diese eigenartige Erscheinung — Phenyl als direkter Substituent der CO-Gruppe erniedrigt bekanntlich die CO-Frequenz —, die demnächst an anderer Stelle eingehender besprochen werden soll, die folgenden Beispiele bekannt:

	Alkylester	Phenylester	$\Delta\omega$
Essigsäure	1735	1763	+28
Propionsäure	1733	1753	+20
Phenylessigsäure	1730	1761	+31
Benzoësäure	1715	1740	+25
Zimtsäure	1712	1742	+30
Salicylsäure	1672	1687	+15

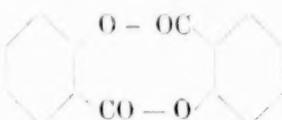
6. Was die salicylsauren Salze anbelangt, so ist bei ihnen der typische spektrale Unterschied gegenüber der Säure, der im Verschwinden der CO-Frequenz und im Neuaufreten von Linien um 1400 cm^{-1} besteht, durch zwei Umstände verwischt. Erstens liegt bei den aromatischen Fettsäuren die CO-Frequenz so tief, daß sie mit den C:C-Frequenzen des Ringes zusammenfällt, so daß das Verschwinden der ersteren nur einen Intensitätsunterschied zur Folge hat; zweitens ist das Frequenzgebiet um 1400 bereits durch andere Linien besetzt, so daß das Neuaufreten von Linien schwerer zu erkennen ist. Immerhin sind in Figur 1 die Intensitätsunterschiede der Linien um 1600 für Säure und Salz in die Augen springend.

B) Die Disalicylide.

Wie in der Einleitung schon erwähnt, kann man bei so vielatomigen Molekülen kaum erwarten, daß aus dem Raman-spektrum die Struktur „abgeleitet“ werden kann. Man muß schon zufrieden sein, wenn man auf die Frage, ob das Raman-spektrum mit einer vorgegebenen Struktur vereinbar sei oder nicht, Antworten ablesen kann. — Das 26-atomige Molekül

⁹ G. V. L. N. MURTI u. T. R. SESHADRI, Proc. Indian Acad. Sci. **10** (1939) 307; **11** (1940) 32.

$[O \cdot C_6H_4 \cdot CO]_2$ tritt (vergleiche die historische Darstellung der Verhältnisse bei L. ANSCHÜTZ¹⁾) in zwei Formen auf, für die Stereoisomerie vorgeschlagen wird derart, daß in



der zentrale Achterring das eine Mal in der „Wannenform“ (flexibler Ring wie bei der Wannenform des Cyclohexans mit der Symmetrie C_2), das andere Mal in der „Sesselform“ (starrer Ring mit Symmetrie C_i) vorliegt; die letztere Konfiguration wird dem β -, die erstere dem α -Disalicylid zugeschrieben.

Die Auswahlregeln liefern folgende Erwartung:

für die Sessel- oder trans-Form:

zu i symm. ; im Ramanspektrum 36 polarisierte Linien
zu i antisymm. ; „ „ „ 36 verbotene Linien.

für die Wannen- oder cis-Form:

zu C_2 symm. ; im Ramanspektrum 36 polarisierte Linien
zu C_2 antisymm. ; „ „ „ 36 depolarisierte Linien.

In beiden Fällen gehören zu jeder der beiden Schwingungsklassen je 4 $\nu(\text{CH})$ -Frequenzen im Gebiet um 3000, so daß im Frequenzgebiet unter 1800 cm^{-1} im ersten Fall 32, im zweiten 64 Linien zu erwarten wären. Nur ein Bruchteil (~ 12) davon wurde beobachtet; dies ist einerseits auf die Ungunst der Beobachtungsbedingungen zurückzuführen, andererseits darauf, daß viele der Eigenschwingungen der beiden gleichartigen Molekühlhälfte $O \cdot C_6H_4 \cdot CO$ infolge der verhältnismäßig nur losen Koppelung so wenig verändert werden — vor allem die $\gamma(\text{CH})$ und $\delta(\text{CH})$ -Schwingungen —, daß die Zahl der unterscheidbaren Frequenzen durch zufällige Entartung stark herabgesetzt wird. Durch den letzteren Umstand wird vor allem der zu erwartende Unterschied in der Linienzahl zwischen den Spektren beider Formen sehr verringert.

In Fig. 2 sind die Spektren von Salol und Diposal denen der beiden Disalicylide gegenübergestellt; im mittleren Frequenzgebiet besteht unbestreitbare Verwandtschaft. Dagegen sind bemerkenswerte Unterschiede im Gebiet 1400—1800 festzustellen; jedoch ist zu bedenken, daß zwischen den Molekülen Nr. 14 und 17 einerseits, 15, 16, 18 andererseits ein wesentlicher Unterschied insoferne besteht, als sich in den ersteren Molekülen

innere oder äußere Chelatringe [Frequenzerniedrigung für $\omega(\text{CO})$] ausbilden können, in den letzteren aber nicht. Hierzu tritt der Umstand, daß sich in 14, 17, 18 die CO-Bindungen in die Ebene des Kernes einstellen und dadurch Mesomerie [neuerliche Frequenzerniedrigung für $\omega(\text{CO})$] ermöglichen können; in den Disalicyliden dagegen ist dies zwar für die flexible Wannen-, nicht aber für die starre Sesselform durchführbar.

Was nun im besonderen die CO-Frequenzen anbelangt, kann man folgendes aussagen: Die Tatsache, daß nur eine einzige CO-Frequenz in Nr. 15 und 16 beobachtet wird, läßt darauf schließen, daß in beiden Formen die beiden CO-Gruppen erstens gleichartig substituiert und zweitens nicht etwa wie im Anhydrid eng gekoppelt sind; dies steht in Übereinstimmung mit der vor-

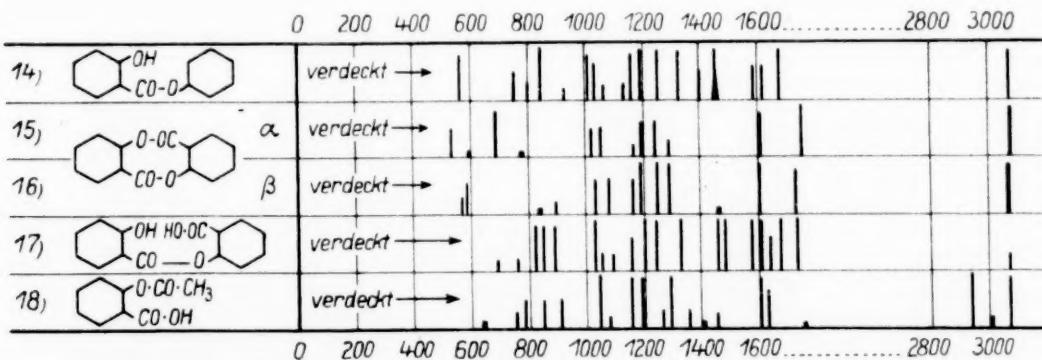


Fig. 2. Kristallpulverspektren von Nr. 14 Salol, Nr. 15 u. 16 Disalicylide, Nr. 17 Diplosal, Nr. 18 Aspirin.

geschlagenen Struktur. Aus dieser kann man umgekehrt eine Erwartung für die Frequenzhöhe ableiten: Diese sollte entweder — wenn Mesomerie möglich ist, also etwa bei der eis-Form — einen ähnlichen Wert (~ 1740 , vgl. A₅) wie im Phenylester der Benzoesäure aufweisen oder — wenn Mesomerie nicht möglich ist, wie etwa in der trans-Form — einen ähnlichen Wert (1750 bis 1760) wie im Phenylester der Essig-, Propion-, Phenylessig-säure. In der Tat wird in Nr. 16 $\omega(\text{CO}) = 1732$, in Nr. 15 $\omega(\text{CO}) = 1753$ gefunden. Ob dies hinreicht, entgegen der üblichen Ansicht das β -Disalicylid als die die Mesomerie ermöglichende eis-Form anzusprechen, bleibe dahingestellt. Im übrigen ist aber auch die Höhe der CO-Frequenz nicht im Widerspruch mit der vorgeschlagenen Struktur.

Wir haben zu danken: Der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Unterstützung unserer Arbeiten, bzw. für die

Gewährung eines Forschungsstipendiums (L. K.) und Herrn Prof. Dr. K. ANSCHÜTZ für die Überlassung der Disalicylide sowie des Disalicylsäure-Anhydrids, dessen Spektroskopierung aber leider nicht gelungen ist.

Anhang.

1. *Salicylsäure Salze*. Zur Reinigung der zur Aufnahme bestimmten Salicylate sei bemerkt: Die zum Umkristallisieren verwendete Aktivkohle wurde zwecks weitgehender Entfernung des stets — auch bei Analysenware — vorhandenen Eisens mit Salzsäure vorbehandelt. Trotzdem waren die erhaltenen wäßrigen Lösungen und meist auch die daraus auskristallisierenden Salze gefärbt. Durch nachfolgendes zweimaliges Umkristallisieren ohne Aktivkohle konnte diese Färbung beseitigt werden.

a) *K-salicylat* + $\frac{1}{2}$ H₂O. (HEYL.) Wassergehalt 3'8% ; Theorie 4'9%. Aufnahme am Kristallpulver in Festkörper-Apparatur F. (Hg-Erregung): F₁ 624, t=54; Ugd. m., Sp. s.; Grenze des Kontinuums bei 560 cm⁻¹.

$\Delta\nu = 811$ (2), 1039 (1), 1100 (1), 1151 (1), 1223 (2), 1261 (1), 1305 (1), 1354 (1), 1404 (1/2), 1471 (0), 1589 (2). —

b) *Ca-salicylat* + 2 H₂O. (HEYL.) Verliert bei ca. 170° (1 At) das Wasser. Wassergehalt 11'1% ; Theorie 10'3%. Aufnahme am Kristallpulver: F₁ 618, t=50; Ugd. m., Sp. m.; Grenze 615 cm⁻¹.

$\Delta\nu = 820$ (5) (f, e); 883 (1/2); 1041 (6) (f, e); 1096 (1/2); 1164 (5); 1238 (4d); 1311 (4d); 1361 (1/2); 1408 (7b); 1496 (3); 1568 (3); 1626 (6). —

c) *Zn-Salicylat* + 2 H₂O. (HEYL.) Verliert das Wasser oberhalb 130°. Wassergehalt 10'3% ; Theorie 9'6%. Aufnahme am Kristallpulver: F₁ 604, t=63, Ugd. m., Sp. m.; Grenze 604 cm⁻¹.

$\Delta\nu = 706$ (1/2); 768 (1/2); 824 (4); 878 (1); 1036 (3) (f, e); 1160 (2); 1229 (5); 1243 (3); 1305 (0); 1342 (0); 1386 (3); 1473 (1d); 1560 (1d); 1618 (1d). —

d) *Mg-salicylat* + 4 H₂O. (HEYL.) Verliert das Wasser oberhalb 150°. Wassergehalt 17'9% ; Theorie 19'4%. Aufnahme am Kristallpulver: F₁ 614, t=48; Ugd. mst., Sp. mst.; Grenze 512 cm⁻¹; F₂ 292 (Hgk-Erregung), t=86; Ugd. st., Sp. s. —

$\Delta\nu = 568$ (5) (e); 818 (6) (k, g, f, e); 867 (4) (e); 1037 (6) (k, f, e); 1140 (6) (k, f, e); 1222 (9) (k, e); 1244 (8) (k, e); 1299 (6) (k, e); 1344 (8) (k, e); 1410 (3/2) (k, e); 1486 (3) (k, e); 1580 (8) (k, e); 1622 (1/2) (k); 3054 (1/2) (k). —

2. *Salicylsäure-ester*. Die Spektren der Säure selbst, ihres Methyl- und Äthylesters wurden in den Mitteilungen 144², 145³, 48⁴ bekanntgegeben. Die nachstehend angeführten Ester wurden in üblicher Weise aus der Säure und dem betreffenden Alkohol mittels HCl dargestellt und mehrmals im Vakuum destilliert.

a) *n-Propylester*: Sdp.₁₂ 115—116°; Sdp.₇₆₀ 245—246° [Lit. Sdp.₇₆₀ 238—240°]; n_{D, 15°50} = 1'5180. Aufnahme an der Flüssigkeit in der Normalapparatur: N 3296, t=12, m. F.; N 3297, m. F., t=27 (verengter Spalt); N 3298, m. F. C., t=10; Ugd. m., Sp. mst.; n=57.

$\Delta\nu = 154$ (6b) (\pm e, c); 187 (2) (e?); 260 (4) (\pm e, c); 308 (3) (e); 357 (1) (e); 433 (3) (e); 465 (5) (e, c); 472 (4) (e); 528 (3) (e); 561 (10) (f, e, c); 615 (1/2) (e); 632 (1) (e); 666 (2) (e); 809 (10) (k, i, g, f, e, c); 862 (1) (e); 908 (5) (k, e); 1030

(9) (k, i, f, e); 1102 (1/2) (e); 1137 (5) (k, e); 1156 (5) (k, e); 1247 (12) (k, f, e); 1327 (9) (k, e); 1347 (5) (k, e); 1400 (6) (k, e); 1467 (10) (k, e); 1583 (5) (k, e); 1614 (7) (k, e); 1672 (10) (e); 1723 (1/2) (e); 2943 (1) (e); 3032 (1/2) (e); 3077 (5) (k, e). —

b) *i-Propylester*: Sdp.₁₂ 106.8–108.2°; Sdp.₇₆₀ 233–235° [Lit. Sdp.?]; $n_{D,17} = 1.5129$. Aufnahmen mit engerem Spalt: N 3301, m. F., t = 27; N 3302, m. F. C., t = 15; Ugd. m., Sp. mst.; n = 70.

$\Delta\nu = 163$ (7) ($\pm e$, c); 257 (5) ($\pm e$, c); 301 (2) (e); 410 (1?) (e); 444 (5) (k, e, c); 478 (6) (k, e, e); 528 (1/2) (k, e); 564 (9) (k, i, f, e, c); 623 (1) (e); 663 (3) (e); 699 (1) (e); 754 (1) (e); 800 (6) (k, i, e, c); 838 (10) (k, e, e); 860 (1) (e); 920 (1) (k, e); 1031 (8) (k, i, f, e); 1102 (1) (k, e); 1141 (5) (k, e); 1159 (4) (e); 1250 (9) (k, i, e); 1322 (8) (k, i, e); 1367 (8) (k, i, e); 1395 (2) (k, e); 1469 (8) (k, e); 1585 (3) (k, e); 1609 (5) (k, e); 1670 (8b) (e); 2907 (2) (k?); 2928 (2) (k, e); 2984 (3) (k, e); 3071 (6) (k, e). —

c) *n-Butylester*: Sdp.₁₂ 131° [Lit. Sdp.?] $n_{D,18.5} = 1.5116$; Aufnahmen: N 3304, m. F., t = 12; N 3305, m. F. C., t = 7; Ugd. m., Sp. mst.; n = 49. —

$\Delta\nu = 152$ (5) ($\pm e$, c); 254 (3) ($\pm e$, c); 307 (1/2) (e); 355 (0) (e); 445 (3) (e, c); 528 (2?) (e, c); 562 (7) (k, f, e, c); 663 (2) (e); 816 (7) (k, e, c); 845 (2) (e); 882 (1/2) (e); 935 (1) (e); 1030 (9) (k, e); 1141 (2) (k, e); 1159 (1/2) (k); 1248 (11) (k, f, e); 1327 (10) (k, e); 1400 (5) (k, e); 1467 (8) (k, e); 1583 (4) (k, f, e); 1614 (5) (k, e); 1672 (9) (e); 2729 (1) (k); 2869 (1/2) (k); 2910 (7) (k, e); 2960 (2) (k); 3070 (6) (k). —

d) *Phenylester* (Salol) (Apothekerware). Zweimal im Hochvakuum (0.02 mm, $\sim 150^{\circ}$ Luftbadtemperatur) destilliert. Schmp. 41–42° [Lit. das gleiche]. Aufnahmen am unterkühlten Zustand in der Normalapparatur: N 3373, m. F., t = 7; N 3373a, m. F. C., t = 4; N 3374, m. F. C., t = 1 1/2; Ugd. m., Sp. st., n = 54. — Aufnahmen am Kristallpulver: F₁ 637, t = 41; Ugd. s., Sp. m., Grenze 454 cm^{-1} ; F₂ 363, t = 24; Ugd. m., Sp. m. —

I (Schmelze) $\Delta\nu = 159$ (12) ($\pm e$); 187 (11) ($\pm e$); 246 (8) (k, e); 315 (4b) (e);
 II (Krist. Pulv.) $\Delta\nu = \leftarrow \text{verdeckt} \rightarrow$
 I 435 (5b) (k, e); 470 (9) (k, $\pm e$); 502 (6) (k, e); 558 (10) ($\pm e$); 613 (8) (k, e);
 II $\leftarrow \text{verdeckt} \rightarrow$ 560 (4) (e); 609 (1/2) (e);
 I 665 (7) (k, e); 748 (8) (k, f, e); 795 (7) (k, e); 840 (10) (k, e); 915 (5) (k, e);
 II —; 750 (2) (k, e); 800 (1) (k, e); 843 (5) (k, e); 922 (1/2) (k, e);
 I 1000 (10) (k, e); 1030 (10) (k, e); 1064 (2) (k, e); 1127 (4) (k, e); 1157 (9) (k, e);
 II 1002 (4) (k, e); 1033 (3) (k, e); 1063 (1/2) (e); 1129 (1) (e); 1154 (4) (k, e);
 I 1195 (10) (k, e); 1246 (13) (k, e); 1332 (14) (k, e); 1394 (7b) (k, e);
 II 1193 (4) (k, e); 1250 (6) (k, e); 1327 (5) (k, i, f, e); 1400 (2) (k, e);
 I 1464 (12) (k, e); 1581 (9) (k, e); 1614 (8) (k, e); 1687 (14) (e); 3061 (10b) (k, e);
 II 1460 (5b) (k, e); 1583 (3) (k, e); 1615 (3) (k, e); 1678 (7) (e); 3071 (6d) (k).

In bezug auf die Frequenzwerte stehen diese Ergebnisse in guter Übereinstimmung mit den Angaben von VENKATESWARAN-BHAGAVANTAM¹⁰; die Intensitätsverteilung dagegen ist recht verschieden.

¹⁰ S. VENKATESWARAN und S. BHAGAVANTAM, Indian. J. Physics 7 (1933) 585.

3. α -Disalicylid (L. ANSCHÜTZ, Brünn). Ohne weitere Vorbehandlung; Aufnahmen am Kristallpulver: F_1 531, $t=57$; F_1 535, $t=80$; Ugd. m., Sp. m.; Grenze 440 cm^{-1} ; F_2 257, $t=34$; F_2 261, $t=53$; Ugd. mst., Sp. m. —

$\Delta\nu=537(2)(e); 597(0)(e); 687(4)(k, i, e); 774(0)(k, e); 1020(2)(k, e); 1059(2)(k, e); 1165(1/2)(k, e); 1196(3)(k, e); 1238(3)(k, e); 1290(1)(k, e); 1604(4)(k, e); 1753(6)(f, e); 3075(12)(k, e); 3146(1/2)(k)$. —

4. β -Disalicylid (L. ANSCHÜTZ, Brünn). Vor den ersten Aufnahmen keine Vorbehandlung; F_1 533, $t=60$, Ugd. st., Sp. m., Grenze 465 cm^{-1} ; F_2 260, Ugd. st., Sp. m. — Hierauf Umkristallisieren mit Aktivkohle aus abs. Alkohol; Schmp. 200 [Lit. Schmp. 199—200°]; F_1 538, $t=60$, Ugd. m., Sp. mst., Grenze 446 cm^{-1} ; F_2 264, Ugd. mst., Sp. st. — Die Spektren vor und nach der Reinigung sind identisch.

$\Delta\nu=517(1?)(e); 593(2)(e); 840(0)(k, e); 899(1/2)(k, e); 1031(3)(k, e); 1080(3)(k, e); 1162(3)(k, e); 1189(5)(k, e); 1245(5)(k, e); 1292(4)(k, i, e); 1466(0)(k, e); 1602(6)(k, g, f, e); 1732(4b)(e); 3073(10)(k)$. —

5. o -Salicoyl-salicylsäure (Diposal) (HEYL). Einmal aus Alkohol mit Aktivkohle umkristallisiert. Schmp. 148—149° [Lit. Schmp. 147—148°]. Aufnahmen am Kristallpulver: F_1 608, $t=66$, Ugd. m., Sp. mst., Grenze 569 cm^{-1} ; F_2 293, $t=59$, Ugd. m., Sp. s. —

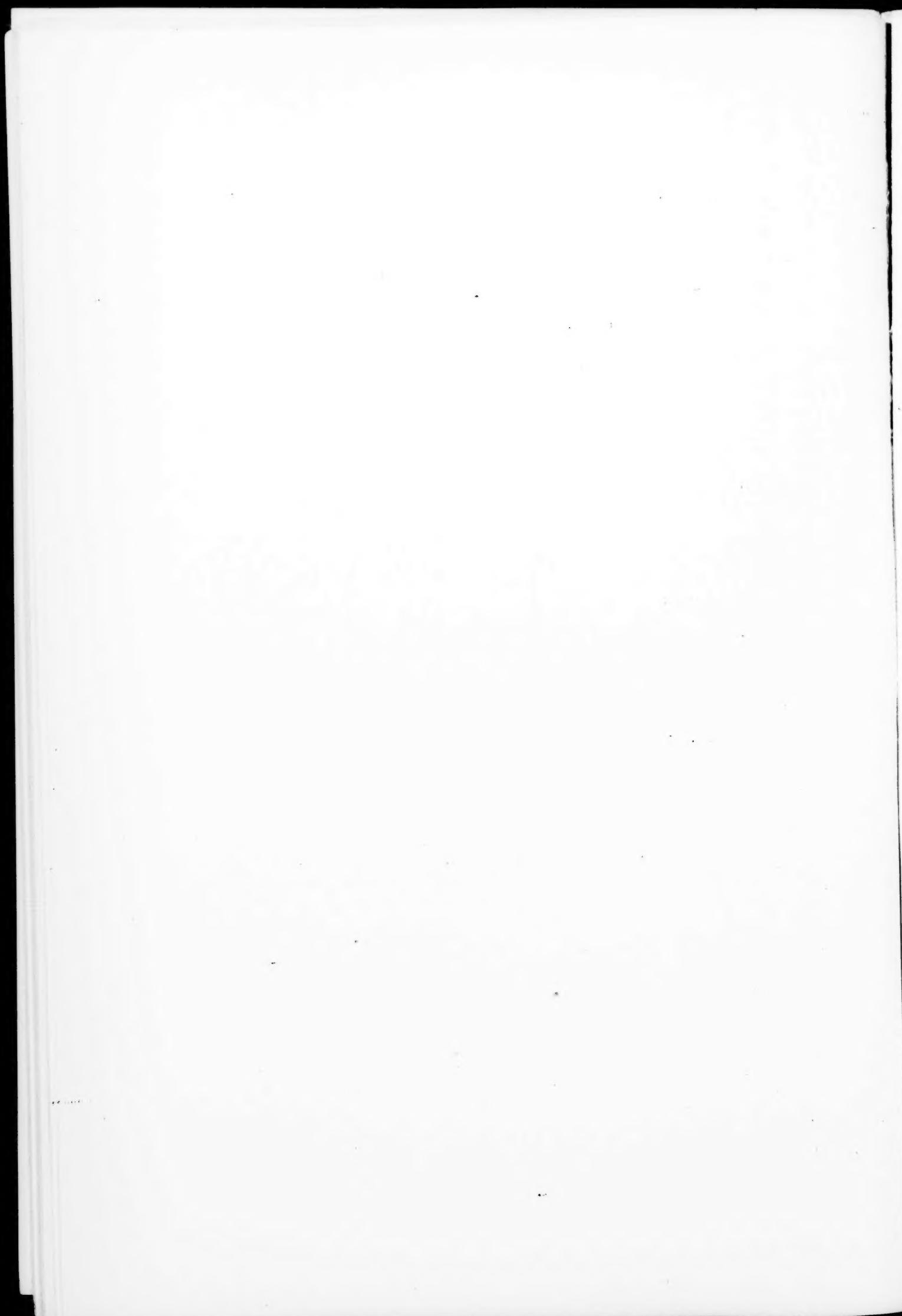
$\Delta\nu=690(1/2)(e); 762(1/2)(k, e); 825(4)(k, e); 851(4)(e); 898(4)(k, e); 1034(6)(k, e); 1060(1)(e); 1098(1)(e); 1158(3)(k, e); 1202(7)(k, e); 1246(7)(k, e); 1332(7)(k, f, e); 1463(5)(k, f, e); 1484(5)(e); 1578(5)(k, e); 1612(7)(k, e); 1643(3)(e); 1679(6)(e); 1738(5)(e); 3068(1)(k, e)$. —

6. Acetyl-salicylsäure (Aspirin) (Apothekerware DAB 6 krist.). Ohne Vorbehandlung aufgenommen; Schmp. 136° [Lit. Schmp. 135°]; F_1 599, $t=58$, Ugd. m., Sp. mst., Grenze 550; F_2 297, $t=61$, Ugd. st., Sp. m. —

$\Delta\nu=639(0?)(k); 756(1)(k, e); 786(2)(k, e); 849(2)(e); 908(2)(e); 1048(5)(k, e); 1080(1/2)(k); 1153(6)(k, e); 1188(6)(k, e); 1262(1)(k); 1294(5)(k, e); 1360(1)(k, e); 1404(0?)(k); 1457(1/2)(k); 1604(7)(k, f, e); 1630(3)(k, e); 1755(0)(e); 2938(5)(k); 3008(1/2)(k); 3074(6)(k, e)$. —

7. Acetylsalicylsäurechlorid. Dargestellt aus Acetylsalicylsäure und Thionylchlorid. 3 mal im Vakuum destilliert. Sdp.₀₅ 104° [Lit. Sdp.₁₂ 135°]. Aufnahmen an der Flüssigkeit: N 3836 und 3388, m. F., $t=12$ u. 14, 3387, o. F., $t=8$. Ugd. m., Sp. st., $n=70$.

$\Delta\nu=147(12)(e); 200(4)(e); 255(2)(e); 290(6)(k, e); 321(5)(\pm e); 404(9)(k, i, \pm e); 462(9)(k, e); 498(8)(k, e); 558(10)(k, e); 698(11)(k, i, f, e); 678(4)(k, e); 709(1)(k, e); 733(7)(k, e); 767(3)(k, e); 807(7)(k, e); 884(2)(k, e); 914(6)(k, f, e); 1010(2)(e); 1040(12)(k, g, f, e); 1160(11)(k, i, f, e); 1194(11)(k, e); 1220(10)(k, i, e); 1304(7)(k, e); 1323(5)(k, e); 1367(2)(k, e); 1477(9)(k, f, e); 1576(4)(k, e); 1600(14)(k, g, f, e); 1682(1?)(e); 1768(12)(e); 2943(4)(e); 3078(10)(k, e)$. —



Akademie der Wissenschaften in Wien
Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse

Monatshefte für Chemie

und

verwandte Teile anderer Wissenschaften

Schriftleitung: Der Sekretär der mathematisch-naturwissenschaftlichen
Klasse E. Späth unter Mitwirkung von J. M. Eder und A. Skrabal

Geschäftsführender Herausgeber:
F. v. WESSELY

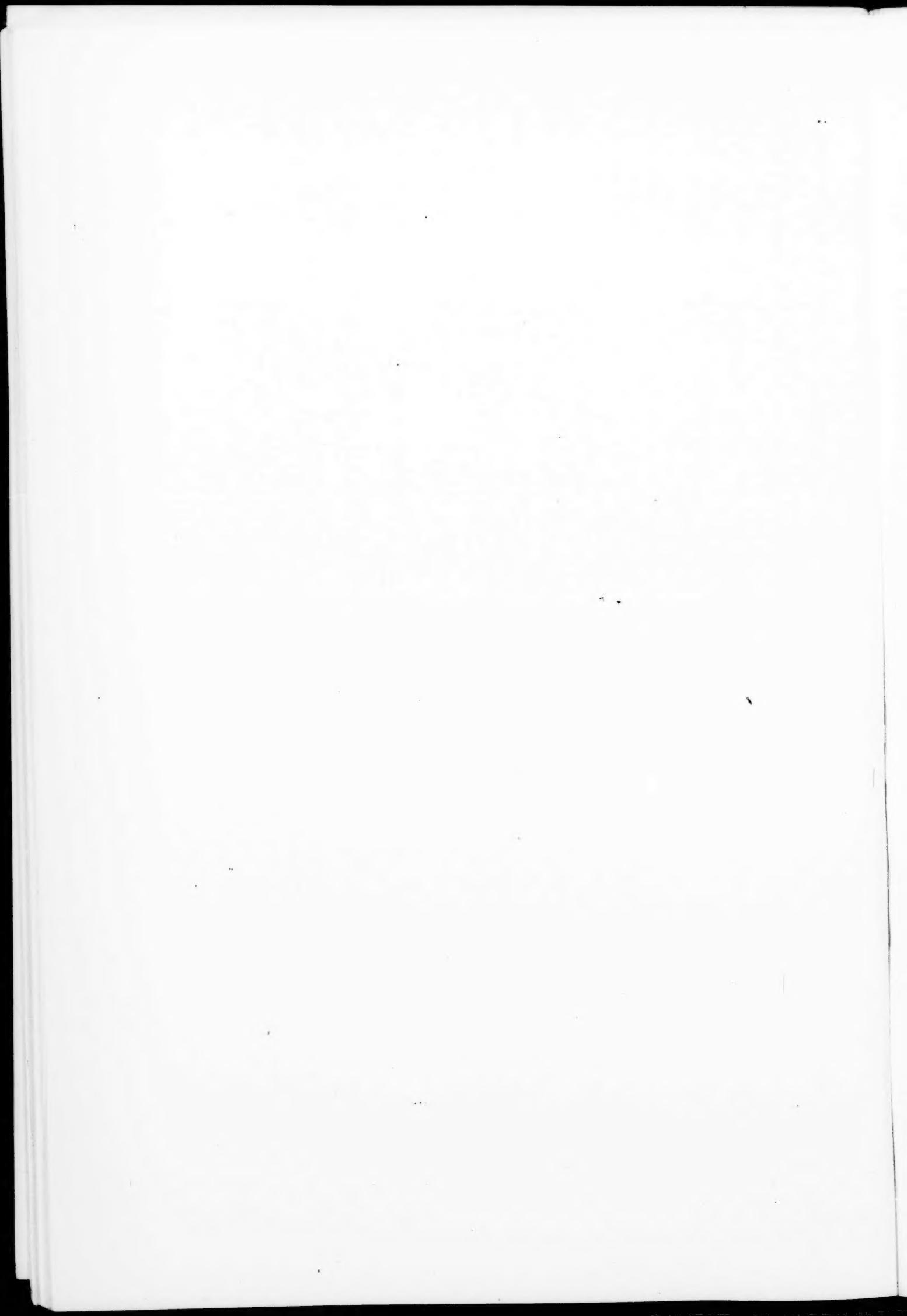
74. Band

Mit 28 Textfiguren



Leipzig und Wien 1943
Akademische Verlagsgesellschaft
Becker & Erler Kom.-Ges., Leipzig

Kommissionsverleger der Akademie der Wissenschaften in Wien: Hölder-Pichler-Tempsky
Wien und Leipzig



In h a l t

	Seite
Balenović K., Solter A. und Munk R., Über ein neues Oxydationsprodukt des Betulins. (Eingegangen am 29. 8. 1941.)	60
Ballaus O., Studien zum Raman-Effekt. (134. Mitteilung.) (Eingegangen am 22. 10. 1941.)	85
Bretschneider H., Zur chromatographischen Trennung von Sterinderivaten. (Eingegangen am 20. 6. 1941.)	53
Bretschneider H. und Ajtai M., Über die Umwandlung von Sterindibromiden in Sterine mit Ferrochlorid. (Eingegangen am 20. 6. 1941.)	57
Dischendorfer O., Über die Kondensation von Benzoin und Naphthoresorcin. (Eingegangen am 13. 5. 1943.)	287
Dischendorfer O. und Ofenheimer E., Über die Kondensation von Benzoin und Orcin. (Mit einer Figur im Text.) (Eingegangen am 10. 5. 1941.)	25
Dischendorfer O. und Ofenheimer E., Über die Kondensation von Benzoin und β-Naphthol. (Mit einer Figur im Text.) (Eingegangen am 12. 5. 1942.)	135
Dischendorfer O. und Ofenheimer E., Zur Kenntnis der bromierten 2,3-Di-phenyl-4,5-benzocumarone. (Eingegangen am 12. 5. 1942.)	149
Eitel A., Über die Kinetik der Cannizzaro-Reaktion. (2. Mitteilung.) (Mit einer Figur im Text.) (Eingegangen am 9. 1. 1942.)	124
Flumiani G. und Bajić V., Beiträge zu Synthesen von Oxyanthrachinonsalzen. (3. Mitteilung.) (Eingegangen am 30. 10. 1941.)	92
Herz E., Studien zum Raman-Effekt. (140. Mitteilung.) (Eingegangen am 7. 11. 1942.)	160
Herz E., Kahorec L. und Kohlrausch K. W. F., Studien zum Raman-Effekt. (143. Mitteilung.) (Mit 2 Figuren im Text.) (Eingegangen am 1. 4. 1943.)	253
Herz E. und Kohlrausch K. W. F., Studien zum Raman-Effekt. (141. Mitteilung.) (Mit 2 Figuren im Text.) (Eingegangen am 7. 11. 1942.) . .	175
Herz E. und Wittek H., Studien zum Raman-Effekt. (144. Mitteilung.) (Mit 3 Figuren im Text.) (Eingegangen am 3. 4. 1943.)	271
Hoffmann J., Uranbestimmungen in Quellen südöstlich des Erzgebirges bis zum Wiener Thermalgebiet. (Mit einer Figur im Text.) (Eingegangen am 6. 6. 1941.)	38
Hoffmann J., Die Bitterquelle von Laa a. d. Thaya. (Eingegangen am 22. 12. 1941.)	118
Kahorec L. und Kohlrausch K. W. F., Studien zum Raman-Effekt. (136. Mitteilung.) (Mit 3 Figuren im Text.) (Eingegangen am 16. 12. 1941.) . .	104
Kahorec L. und Kohlrausch K. W. F., Studien zum Raman-Effekt. (147. Mitteilung.) (Mit 2 Figuren im Text.) (Eingegangen am 23. 6. 1943.) . .	333
Kahorec L. und Wagner J., Studien zum Raman-Effekt. (145. Mitteilung.) (Mit 3 Figuren im Text.) (Eingegangen am 3. 4. 1943.)	279
Kohlrausch K. W. F. und Wittek H., Studien zum Raman-Effekt. (131. Mitteilung.) (Mit 3 Figuren im Text.) (Eingegangen am 3. 5. 1941.) . . .	1

	Seite
<i>Kosmath W.</i> , Messungen der Exhalation von Schwefelwasserstoff aus Schwefelwasserstoffwässern. (Mit 4 Figuren im Text.) (Eingegangen am 14. 12. 1942.)	189
<i>Kosmath W.</i> und <i>Jekel E.</i> , Der Luftschwefelwasserstoff in den Badehäusern des Heilbades Baden bei Wien. (Mit einer Figur im Text.) (Eingegangen am 15. 7. 1941.)	67
<i>Kubicek G.</i> , Über die katalytische Hydrierung des NN'-Di-m-tolyl-benzamidins. (1. Mitteilung.) (Eingegangen am 20. 11. 1941.)	100
<i>Lock G.</i> , Über die Acetylierung des Naphthalins. (Eingegangen am 21. 10. 1941.)	77
<i>Rebek M.</i> , Aufteilung der Bildungswärmen organischer Moleküle auf Bindungskremente. (Eingegangen am 18. 3. 1943.)	241
<i>Seka R.</i> , <i>Bach G.</i> und <i>Kellermann W.</i> , Über Verfahren zur Darstellung von Derivaten des Tribenzoylenbenzols. (Eingegangen am 19. 11. 1942.)	223
<i>Seka R.</i> und <i>Lackner L.</i> , Zur Kenntnis des Tribenzoylenbenzols und seiner Derivate. (Eingegangen am 19. 11. 1942.)	212
<i>Skrabal A.</i> , Die chemische Bruttoreaktion als Ergebnis von Simultanreaktionen. (Eingegangen am 5. 5. 1943.)	293
<i>Wogrinz A.</i> , Zur Bestimmung des gesamten (CN) in cyanalkalischen galvanotechnischen Bädern. (Mit einer Figur im Text.) (Eingegangen am 5. 1. 1943.)	233

Nächste Sitzungen der mathem.-naturw. Klasse der Akademie der
Wissenschaften in Wien 1943:

2. und 16. Dezember 1943.

Der natürliche Ablauf der Entropievermehrung und die Lebenserscheinungen

Von Dr.-Ing. J. N. HUMMEL, Berlin

1941. 128 Seiten. Preis kart. RM 6.40

Aus dem Inhalt: Problemstellung — Teilung aller Vorgänge in zwei Klassen — Systemfunktionen — Gefügeänderungen — Die Individuen — Die erste Ordnung im zeitlichen Ablauf der Entropievermehrung — Die Umwelt der Individuen — Beziehungen zwischen den Systemfunktionen und den Gefügeänderungen einerseits und ihren Ergänzungsprozessen anderseits — Abbau und Aufbau freier Energie — Maschinen und Lebewesen — Unser Weltbild — Fortschritt und Rückschritt — Das Ziel der Entwicklung.

Akademische Verlagsgesellschaft Becker & Erler Kom.-Ges., Leipzig

PHYSIK UND CHEMIE
und ihre Anwendungen in Einzeldarstellungen

ELEKTROLYTLÖSUNGEN

Von Dr. Gustav Kortüm, Tübingen

1941. XIV, 483 Seiten mit 78 Abbildungen. Preis RM 26.—, Lie. RM 28.—

Aus dem Inhalt:

Die Entwicklung der Elektrolyttheorie — Die Thermodynamik verdünnter Lösungen — Energetische und molekulare Vorgänge bei der Auflösung eines Salzes — Experimentelle Nachweise für die Unzulänglichkeit der klassischen Dissoziationstheorie — Experimentelle Methoden der Bestimmung von Dissoziationsgraden und Aktivitätskoeffizienten — Die Debye-Hückel-Theorie — Prüfung der Grenzgesetze — Der Ionendurchmesser — Unvollständige Dissoziation starker Elektrolyte — Die Bedeutung von der Waalscher Kräfte für Elektrolytlösungen — Konzentrierte Lösungen — Diffusionspotentiale und Ionenaktivitäten — Anwendungen der ionischen Wechselwirkung auf die Auswertung von Meßergebnissen — Säuren und Basen — Dissoziationskonstanten und chemische Konstitution — Die Kinetik der katalytischen Neutralsalzwirkung — Aussalz- und Einsalzeffekt — Wechselwirkung zwischen Ionen und Lösungsmittelmolekülen.

Akademische Verlagsgesellschaft Becker & Erler Kom.-Ges., Leipzig

GALVANOTECHNIK

Von W. PLANCKE

unter Mitarbeit von

R. Bilfinger, G. Elssner, A. Gabler-Gundertz, A. Herrmann, F. Kox, H. Krause, R. Radenhausen, R. Springer, M. Voelcker, K. M. Wagner, R. Weizsäcker

Zwei Bände, 1941, 1591 Seiten mit 794 Abb. Preis RM 75,-

Aus dem Inhalte:

Teil I: Theoretische Grundlagen — Teil II: Die Erzeugung dauerhafter Überzüge: Einrichtung galvanotechnischer Anlagen — Vor- und Nachbereitung der Ware — Metallische Schichten — Nichtmetallische Schichten — Prüfung — Bädern und Niederschlägen — Teil III: Die Herstellung starker Schichten (Galvanoplastik): Vor- und Nachbearbeitung — Die galvanoplastischen Arbeitsmethoden. Anhang: Kalkulation, Normung, Tabellen, Patentverzeichnis, Register.

Akademische Verlagsgesellschaft Becker & Erler Kom.-Ges., Leipzig

Hand- und Jahrbuch der chemischen Physik

Herausgegeben von Prof. Dr. A. Eucken, Göttingen und Prof. Dr. K. L. Wolf, Berlin

Band 2: Atome, Ionen und Moleküle

Band 2, Abschnitt A

ATOME UND IONEN

Von Prof. Dr. G. BRIEGLEB, Würzburg

1940, 404 Seiten mit 150 Abbildungen. Preis RM 38.50

Der vorliegende Teilband des „Hand- und Jahrbuch der chemischen Physik“ will einen zusammenfassenden, vollständigen Überblick über die wichtigsten experimentellen und theoretischen Ergebnisse der Forschung über die Struktur- und Eigenschaften der Atome und Ionen geben. Der Schwerpunkt der Darstellung wurde in erster Linie auf die Schilderung des experimentell sichergestellten Sachenbestandes und der daraus folgenden allgemeinen Gesetzmäßigkeiten gelegt.

Akademische Verlagsgesellschaft Becker & Erler Kom.-Ges., Leipzig